

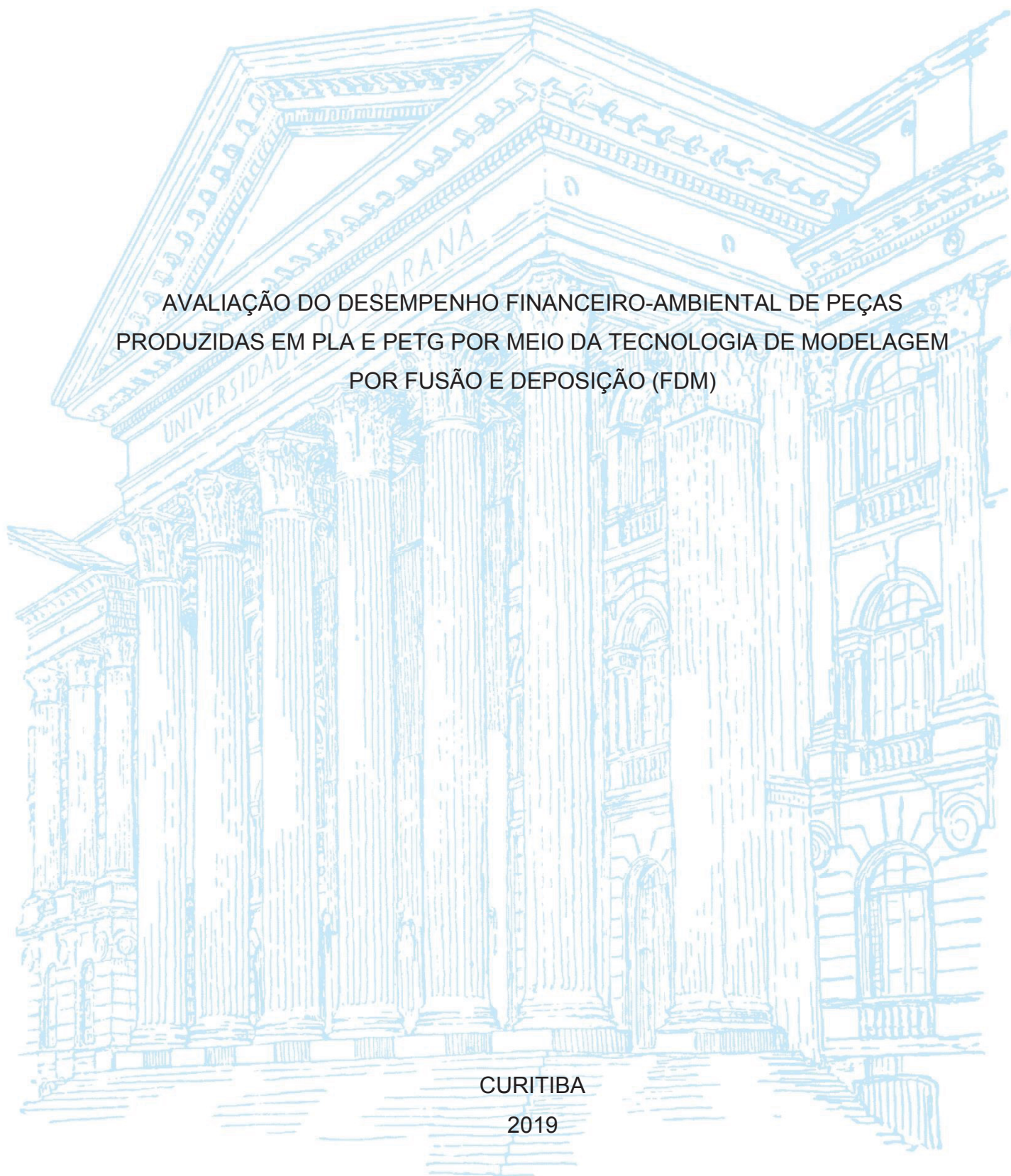
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TIAGO YUITI KAMIYA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FINANCEIRO-AMBIENTAL DE PEÇAS
PRODUZIDAS EM PLA E PETG POR MEIO DA TECNOLOGIA DE MODELAGEM
POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM)

CURITIBA

2019



TIAGO YUITI KAMIYA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FINANCEIRO-AMBIENTAL DE PEÇAS
PRODUZIDAS EM PLA E PETG POR MEIO DA TECNOLOGIA DE MODELAGEM
POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM)

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcell Mariano Corrêa Maceno

Orientadora: Profa. Dra. Mariana Kleina

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

K15a

Kamiya, Tiago Yuiti

Avaliação do desempenho financeiro-ambiental de peças produzidas em PLA e PETG por meio da tecnologia de modelagem por fusão e deposição (FDM) [recurso eletrônico] / Tiago Yuiti Kamiya. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção, 2019.

Orientador: Marcell Mariano Corrêa Maceno. Coorientadora: Mariana Kleina.

1. Impressão 3D. 2. Impressão 3D - Desenvolvimento sustentável. 3. Indústria - Tecnologia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Maceno, Marcell Mariano Corrêa. III. Kleina, Mariana. IV. Título.

CDD: 621.98

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO - 40001016070P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **TIAGO YUITI KAMIYA** intitulada: **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FINANCEIRO-AMBIENTAL DE PEÇAS PRODUZIDAS EM PLA E PETG POR MEIO DA TECNOLOGIA DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM)**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 27 de Fevereiro de 2019.


MARCELL MARIANO CORRÊA MACENO
Presidente da Banca Examinadora


OSIRIS CÂNCIGLIERI JUNIOR
Avaliador Externo (PUC/PR)


MARIANA KLEINA
Avaliador Interno (UFPR)


IZABEL CRISTINA ZATTAR
Avaliador Interno (UFPR)


JOSÉ EDUARDO PÉCORA JUNIOR
Avaliador Interno (UFPR)

RESUMO

A impressão 3D tem demonstrado destaque ao ser utilizada para fabricação de peças personalizadas e com geometria complexa sem a utilização de moldes e com o menor custo envolvido. Várias são as tecnologias que compõem a Manufatura Aditiva, de acordo com as matérias-primas utilizadas, tais como pós, polímeros e resinas. A tecnologia FDM tem demonstrado grande avanço devido sua acessibilidade e sua produção em pequena escala. O PLA e o ABS são os materiais comumente utilizados nesta tecnologia, porém o ABS necessita de mesa aquecida para a realização da impressão de peças. O PETG torna-se uma opção por apresentar características similares ao ABS. Os parâmetros de processo têm influência direta na determinação de características específicas exigidas na fabricação. Inúmeros são os parâmetros encontrados na literatura, dentre os quais serão definidos os que afetam a precisão dimensional, característica essencial à peça escolhida (calibre de folga). O rápido desenvolvimento da tecnologia FDM tem demonstrado o interesse pelo seu estudo quando relacionados a avaliação da sustentabilidade desta tecnologia. As avaliações ambiental e econômica, foco deste estudo, foram definidas a partir de experimentos realizados, controlando o parâmetro e sua influência na precisão dimensional. Os resultados são descritos a partir de gráficos de caracterização, pontuação única e normalização. Esta última foi desdobrada a partir das 5 contribuições de maior impacto, sendo novamente desdobrada em resultados de inventário e contribuição do processo. O desempenho ambiental foi mensurado a partir do comparativo entre a pontuação única dos dois materiais, e o material PETG caracterizou-se por possuir maior impacto ambiental em relação ao PLA. Para o desempenho econômico foram comparados custos de produtos e resíduos, este demonstrou que os custos totais de produto do PETG são maiores que do PLA, mas a situação se inverte quando relacionado aos custos totais de resíduos, sendo o do PLA superior ao do PETG. Neste contexto, devido ao maior valor proporcional nos custos de resíduos para o PLA pela CCFM, quando comparados ao valor proporcional de potencial de impacto ambiental pela ACV, foi definido que o PETG apresentou melhor desempenho econômico-ambiental para o cenário estudado.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Parâmetro de Processo. FDM. ACV. CCFM.

ABSTRACT

3D printing has been shown to be used to manufacture custom parts and with complex geometry without the use of molds and at the lowest cost involved. There are several technologies that make up the Additive Manufacturing, according to the raw materials used, such as powders, polymers and resins. FDM technology has shown great advancement due to its accessibility and small scale production. PLA and ABS are the materials commonly used in this technology, but ABS requires a heated desk for the production of parts. PETG becomes an option because it presents characteristics similar to ABS. The process parameters have a direct influence on the determination of specific characteristics required in the manufacturing process. Numerous are the parameters found in the literature, among which will be defined those that affect the dimensional accuracy, essential characteristic to the piece chosen (clearance gauge). The rapid development of FDM technology has demonstrated the interest in its study when related to the evaluation of the sustainability of this technology. The environmental and economic evaluations, the focus of this study, were defined from experiments carried out, controlling the parameter and its influence on dimensional accuracy. The results are described from characterization graphs, single punctuation and normalization. The latter was deployed from the 5 highest impact contributions, and was further deployed in inventory results and process contribution. The environmental performance was measured from the comparison between the single score of the two materials, and the PETG material was characterized by having a greater environmental impact in relation to the PLA. For the economic performance, costs of products and waste were compared, which showed that the total costs of PETG product are higher than that of the PLA, but the situation is reversed when related to the total costs of waste, being that of the PLA superior to that of PETG. In this context, due to the greater proportional value of the waste costs to the PLA by the CCFM, when compared to the proportional value of environmental impact potential by the LCA, it was defined that PETG presented a better economic-environmental performance for the scenario studied.

Keywords: Additive Manufacturing. Process Parameter. FDM. ACV. MFCA.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: PROCESSOS DE FABRICAÇÃO EM MANUFATURA ADITIVA.....	21
FIGURA 2: PROCESSO E COMPONENTES DA TECNOLOGIA <i>STEREOLIOGRAPHY</i>	21
FIGURA 3: PROCESSO E COMPONENTES DA TECNOLOGIA POLYJET	22
FIGURA 4: PROCESSO E COMPONENTES DA TECNOLOGIA ELECTRON BEAM MELTING	23
FIGURA 5: PROCESSO E COMPONENTES DA TECNOLOGIA LASER ENGINEERED NET SHAPING	23
FIGURA 6: ESQUEMA DO PROCESSO DE IMPRESSÃO	25
FIGURA 7: ORIENTAÇÃO DE CONSTRUÇÃO IMPRESSÃO DE UMA PEÇA	29
FIGURA 8: ESPESSURA DE CAMADA NA CONSTRUÇÃO DA PEÇA.....	29
FIGURA 9: CAMINHO DA IMPRESSÃO EM FDM.....	29
FIGURA 10: ETAPAS DA ACV	32
FIGURA 11: COMPONENTES DO ESTÁGIO DA AICV	35
FIGURA 12: ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO DA CCFM	38
FIGURA 13: EXEMPLO DE CENTRO DE CUSTO DO CCFM	40
FIGURA 14: FLUXO DE TRABALHO.....	43
FIGURA 15: INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO Z OFFSET	45
FIGURA 16: CALIBRE DE FOLGA UTILIZADA NA PESQUISA	46
FIGURA 17: FLUXOGRAMA DE IMPRESSÃO 3D	48
FIGURA 18: REGIÃO COM MAIOR DESGASTE	50
FIGURA 19: ETAPAS DE REALIZAÇÃO DA CCFM.....	58
FIGURA 20: CENTROS DE CUSTOS DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D COM IDENTIFICAÇÃO DE ENTRADAS E SAÍDAS DE PROCESSO	59
FIGURA 21: COMPARATIVO DOS CENÁRIOS DO CICLO DE VIDA DO PLA E PETG PELO MÉTODO IMPACT 2002+ (CARACTERIZAÇÃO)	61
FIGURA 22: COMPARATIVO DOS CENÁRIOS DO CICLO DE VIDA DO PLA E PETG PELO MÉTODO IMPACT 2002 (NORMALIZAÇÃO).....	62
FIGURA 23: COMPARATIVO DOS CENÁRIOS DO CICLO DE VIDA DO PLA E PETG PELO MÉTODO IMPACT 2002+ (PONTUAÇÃO ÚNICA)	63

FIGURA 24: SEQUENCIAMENTO DA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL E ECONÔMICO EM PROCESSOS DE IMPRESSÃO 3D.	87
FIGURA 25: CUSTOS TOTAIS PARA PRODUTO E RESÍDUO DE CADA MATERIAL	91

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: DESGASTE DA PEÇA DE PLA PARA A ESPESSURA DE 2,71 MM	51
GRÁFICO 2: DESGASTE DA PEÇA DE PLA PARA A ESPESSURA DE 3,72 MM	51
GRÁFICO 3: DESGASTE DA PEÇA DE PETG PARA A ESPESSURA DE 2,69 MM	52
GRÁFICO 4: DESGASTE DA PEÇA DE PETG PARA A ESPESSURA DE 3,70 MM	52
GRÁFICO 5: INVENTÁRIO – AQUECIMENTO GLOBAL	64
GRÁFICO 6: INVENTÁRIO – AGENTES CANCERÍGENOS	66
GRÁFICO 7: INVENTÁRIO – RESPIRAÇÃO DE INORGÂNICOS	67
GRÁFICO 8: INVENTÁRIO – ENERGIA NÃO-RENOVÁVEL	68
GRÁFICO 9: INVENTÁRIO – OCUPAÇÃO DO SOLO	69
GRÁFICO 10: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – AGENTES CANCERÍGENOS	71
GRÁFICO 11: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – AQUECIMENTO GLOBAL – CORTE ACIMA DE 1%	72
GRÁFICO 12: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – OCUPAÇÃO DO SOLO	74
GRÁFICO 13: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – ENERGIA NÃO-RENOVÁVEL	76
GRÁFICO 14: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – RESPIRAÇÃO INORGÂNICA	79
GRÁFICO 15: CUSTOS DE PRODUTO – COMPARATIVO ENTRE PLA E PETG – CENTRO DE CUSTO 1	83
GRÁFICO 16: CUSTOS DE PRODUTO – COMPARATIVO ENTRE PLA E PETG – CENTRO DE CUSTO 3	84
GRÁFICO 17: CUSTOS DE RESÍDUOS – COMPARATIVO ENTRE PLA E PETG – CENTRO DE CUSTO 1	85
GRÁFICO 18: CUSTOS DE RESÍDUOS – COMPARATIVO ENTRE PLA E PETG – CENTRO DE CUSTO 3	86

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	43
QUADRO 2: PARÂMETROS DE PROCESSO QUE IMPACTAM AS CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS	44
QUADRO 3: VIDA ÚTIL DAS PEÇAS DE PLA E PETG	53
QUADRO 4: DEFINIÇÃO DE OBJETO E ESCOPO	54
QUADRO 5: FUNÇÃO, UNIDADE FUNCIONAL E FLUXO DE REFERÊNCIA.....	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: LEVANTAMENTO DE MATERIAIS, ENERGIAS E PROCESSOS CORRELATOS PARA COMPOSIÇÃO DO ICV DAS PEÇAS DE PETG E PLA	56
TABELA 2: INVENTÁRIO – AQUECIMENTO GLOBAL	65
TABELA 3: INVENTÁRIO – AGENTES CANCERÍGENOS.....	66
TABELA 4: INVENTÁRIO – RESPIRAÇÃO DE INORGÂNICOS	67
TABELA 5: INVENTÁRIO – ENERGIA NÃO-RENOVÁVEL	69
TABELA 6: INVENTÁRIO – OCUPAÇÃO DE SOLO	70
TABELA 7: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – AGENTES CANCERÍGENOS.....	72
TABELA 8: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – AQUECIMENTO GLOBAL.....	73
TABELA 9: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – OCUPAÇÃO DE SOLO	75
TABELA 10: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – ENERGIA NÃO RENOVÁVEL ...	77
TABELA 11: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – RESPIRAÇÃO INORGÂNICA....	79
TABELA 12: DADOS DA CCFM PARA O MATERIAL PETG.....	82
TABELA 13: DADOS DE CCFM PARA O MATERIAL PLA	82
TABELA 14: RESULTADOS TOTAIS E POR CATEGORIAS DE IMPACTO	90

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABS	- Acrilonitrila Butadieno Estireno
ACV	- Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	- Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
AMF	- <i>Additive Manufacturing File</i>
CAD	- <i>Computer Aided Design</i>
CCFM	- Contabilidade dos Custos de Fluxo de Material
CNC	- <i>Computer Numerical Control</i>
EBM	- <i>Electron Beam Melting</i>
FDM	- <i>Fused Deposition Modeling</i>
ICV	- Inventário do Ciclo de Vida
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
LENS	- <i>Laser Engineered Net Shaping</i>
LOM	- <i>Laminated Object Manufacturing</i>
MA	- Manufatura Aditiva
MCDA	- <i>Multi-Criteria Decision Analysis</i>
MFCA	- <i>Material Flow Cost Accounting</i>
PC	- Policarbonato
PDCA	- <i>Plan-Do-Check-Action</i>
PETG	- Politereftalato de etileno glicol
PGA	- Ácido poliglicólico
PLA	- Ácido Polilático
PLGA	- Poli(Ácido lático-co-ácido glicólico)
PPSF	- Polifenilsulfona
SGA	- Sistema de Gestão Ambiental
SL	- <i>Stereolithography</i>
SLA	- <i>Stereolithography</i>
SLS	- <i>Selective Laser Sintering</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 MANUFATURA ADITIVA.....	20
2.2 MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO	24
2.3 O PETG E O PLA NA TECNOLOGIA FDM.....	26
2.4 PARÂMETRO DE PROCESSO	27
2.4.1 Precisão dimensional	30
2.5 DESEMPENHO AMBIENTAL UTILIZANDO A ACV.....	31
2.5.1 Definição de objetivo e escopo.....	32
2.5.1.1 Função, unidade funcional e fluxos de referência	33
2.5.1.2 Fronteira do sistema.....	33
2.5.2 Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)	34
2.5.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	34
2.5.4 Interpretação dos resultados obtidos nas fases de ICV ou AICV	35
2.5.5 Estudos existentes de ACV e Manufatura Aditiva	36
2.6 DESEMPENHO ECONÔMICO UTILIZANDO A CCFM.....	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA	42
3.2 DESCRIÇÃO DE ETAPAS DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA	43
3.2.1 Identificação do problema e definição de parâmetros de impressão.....	44
3.2.2 Definição de produto de impressão	45
3.2.3 Fluxograma de impressão, Teste e Impressão definitiva	47
3.2.4 Mensuração da vida útil das peças	50
3.2.5 Avaliação do Ciclo de Vida das Peças	53
3.2.5.1 Definição de objetivo e escopo.....	53
3.2.5.2 Função, unidade funcional e fluxo de Referência	54

3.2.5.3 Definição de sistema de produto, fronteira de sistema, pressupostos, procedimentos de alocação, método de caracterização e simulação da ACV	55
3.3 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA.....	56
3.4 CONTABILIDADE DE CUSTO EM FLUXOS MATERIAIS DAS PEÇAS.....	57
3.4.1 Especificação das fronteiras e do fluxo de referência de análise	58
3.4.2 Determinação dos centros de custo e identificação de entradas e saídas	58
4 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	60
4.1 RESULTADOS DA ACV DAS PEÇAS DE PLA E PETG.....	60
4.1.1 RESULTADOS DE INVENTÁRIO (CONTRIBUIÇÃO POR MATERIAIS)	63
4.1.2 RESULTADOS DE CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO	70
4.2 RESULTADOS DA CCFM DAS PEÇAS DE PLA E PETG.....	81
4.3 RESULTADOS DO SEQUENCIAMENTO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ACV E CCFM PARA IMPRESSÃO 3D.....	86
4.4 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO AMBIENTAL E ECONÔMICO DAS PEÇAS DE PLA E PETG	88
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D é uma técnica de manufatura aditiva (MA) para a fabricação de uma ampla diversidade de produtos com geometrias complexas a partir de um modelo tridimensional, pela sucessiva deposição de camadas acima da camada anterior. Esta técnica foi desenvolvida por Charles Hull em 1986, no processo conhecido como SLA (*stereolithography*) em que ocorria a fusão de uma camada de pó, seguindo pela tecnologia de impressão de jato de tinta e a FDM (*Fused deposition modeling*), utilizando materiais poliméricos (NGO *et al.*, 2018).

Dentre as tecnologias de Manufatura Aditiva, há o destaque principal para o FDM, que possui a maior parcela de peças produzidas. Esta é caracterizada pela produção de peças camada por camada, orientação voltada de baixo para cima, ao ocorrer o aquecimento e extrusão de um filamento termoplástico (STRATASYS, 2017). Os termoplásticos utilizados como matéria-prima possuem características mecânicas e ambientalmente estáveis quando aplicados na indústria. As geometrias, antes consideradas complexas, são produzidas com maior praticidade pelos equipamentos desta tecnologia (STRATASYS, 2017).

Entre os materiais disponíveis para utilização o ABS (acrilonitrila butadieno estireno) e o PLA (ácido polilático) são os dois materiais com maior utilização na impressão 3D. Outros materiais podem ser utilizados, tais como o PETG (politereftalato de etileno glicol), o polifenil sulfona e o policarbonato, mas exige-se o uso de uma sofisticada tecnologia na fabricação destes dois últimos filamentos. O PLA, considerado material biodegradável, absorvível e biocompatível, é utilizado para fabricação de inúmeros componentes e objetos, além de possuir a característica de ser facilmente utilizado em impressoras 3D comerciais de baixo custo (AHMED e SUSMEL, 2017). O ABS possui a característica de necessitar de uma mesa aquecida para sua impressão, e apresenta uma contração alta em seu resfriamento (CLIEVER, 2017). O PETG possui a característica de não necessitar de mesa aquecida para a impressão de peças, e aparece como uma alternativa ao ABS, oferecendo uma boa resistência ao impacto, alta durabilidade e contração menor quando comparado ao ABS (CLIEVER, 2017). O PETG é considerado um polímero de adequada transparência e acabamento, amplamente reciclável, baixo custo e uma considerável diversidade de uso e aplicações (BRAZIL POLYMERS, 2018).

A acessibilidade à aquisição de impressoras 3D está expandindo suas aplicações, tais como em escolas, residências, bibliotecas, e laboratórios, em contradição ao seu início, na qual eram largamente utilizados por arquitetos e designers. Suas vantagens estão relacionadas ao menor desperdício de material, liberdade para o design da peça, geometria complexa com alta precisão, não há a necessidade de moldes, automação, minimização das despesas incorridas pelo desenvolvimento de produtos, a possibilidade de produção de peças personalizadas em pequena escala e a preços menores. Entretanto, os materiais utilizados por tal tecnologia são limitados, suas propriedades mecânicas necessitam de melhorias, há um grande consumo de tempo na fabricação de uma peça e ferramentas para o custeio de ciclo de vida e CAD (*Computer Aided Design*) precisam tornar sua interface mais amigável para o usuário (NGO *et al.*, 2018).

De acordo com a publicação na *Wohlers Report* em 2017, houve a progressão no número de fabricantes que produziram e venderam sistemas de manufatura aditiva, que em 2014 eram 49 empresas, em 2015 passou a 62 empresas e em 2016 a 97 empresas. A indústria de manufatura aditiva cresceu 17,4% em receita mundial no ano de 2016, representando \$6.063 bilhões na indústria de manufatura aditiva (KIANIAN, 2017).

No processo de manufatura aditiva, a impressão 3D se dá por meio da utilização de filamentos poliméricos. Neste contexto, certos termoplásticos possuem a função de formar copolímeros, para auxiliar nas características do produto final a ser impresso. As propriedades de rigidez, leveza, flexibilidade e resistência ao impacto são características geradas por tal composição (ABREU, 2015).

Na atualidade, filamentos de origem renovável vem sendo utilizados como possibilidade para impressão 3D. Os recursos renováveis são utilizados gradualmente na fabricação dos polímeros, e suas oportunidades de uso vão desde áreas de alto valor a aplicações básicas como embalagens. A avaliação do ciclo de vida pode ser utilizada para quantificar os benefícios ambientais destes polímeros sustentáveis (ZHU *et al.*, 2017).

Os benefícios ambientais pela utilização de materiais biodegradáveis na impressão 3D tem sido estudados com maior frequência na literatura. O PLA é comumente utilizado em impressoras de baixo custo, tendo por vantagem a impressão de peças em superfícies que não necessitam de aquecimento (ABREU, 2015). O PETG é considerado um intermediário entre o PLA e o ABS, sendo mais flexível e

durável que o PLA é mais fácil de imprimir que o ABS, além de ser utilizado em peças que podem sofrer estresse contínuo ou súbito como peças mecânicas, de impressora e componentes de proteção (ALL3DP, 2017). As peças finais produzidas pela tecnologia FDM podem ser caracterizadas pelos seus aspectos técnicos (resistência a tração, flexão, impacto, precisão dimensional) assim como pelos seus aspectos econômicos (tempo de fabricação, quantidade de suporte e material utilizados) (GÓRSKI *et al.*, 2013).

A partir do contexto exposto, a pesquisa está em torno da seguinte questão: Quais os impactos ambientais e econômicos ao se utilizar o PLA e o PETG como matéria-prima na construção de uma mesma peça para utilização na indústria, pelo processo de manufatura aditiva, em especial a tecnologia FDM?

1.1 JUSTIFICATIVA

O desempenho de um sistema de manufatura é avaliado em relação às características de fabricação, tais como custo, tempo, qualidade e flexibilidade. Contudo, para lidar com o esgotamento de recursos naturais e os impactos ambientais, a fabricação atual deve ser balanceada do ponto de vista ambiental, social e econômico (BASHKITE *et al.*, 2014). Na atualidade as indústrias estão buscando a redução da quantidade de matéria-prima e tempo consumidos nos processos de fabricação, mas sem prejudicar o desempenho dos produtos acabados (MA *et al.*, 2018). Berman (2012) descreve a possibilidade de atingir este objetivo ao utilizar a Manufatura Aditiva, sendo que sua aplicação em ambientes industriais tem aumentado nas últimas duas décadas.

Em comparação à fabricação convencional, a Manufatura Aditiva pode ser mais eficiente em termos de custo e tempo, principalmente na produção em pequena escala e produtos personalizados (KAFARA *et al.*, 2017). Os resíduos gerados pela Manufatura Aditiva são potencialmente menores quando comparados com a manufatura convencional (HUANG *et al.*, 2015). Entretanto estes resíduos ainda estão presentes e em certos casos em quantidades muito maiores que o estimado, devido a erros humanos e de máquinas (SONG e TELENKO, 2017). Díaz Lantada *et al.*, (2017) realizaram esforços para reduzir os impactos ambientais causados pelas estruturas de suporte necessárias em impressões específicas. O desperdício gerado no processo de impressão aliado ao gerenciamento de impressões com falha e os

produtos de fim de vida produzidos pela Manufatura Aditiva são alguns dos problemas levantados, em especial para peças poliméricas (REJESKI *et al.*, 2017).

O rápido desenvolvimento dos mercados de impressoras 3D, em especial a FDM, deve aumentar os tipos de materiais utilizados para fabricação de filamentos. Essa diversificação de filamentos, aliados a fórmulas próprias com aditivos não revelados para melhoria de desempenho de material, deve aumentar os desafios para a reciclagem do plástico assim como sua remanufatura (REJESKI *et al.*, 2017).

A crescente conscientização ambiental seguida de uma legislação ambiental mais rigorosa fez com que o aspecto ecológico se movimentasse para o centro das atenções, não somente considerando os critérios econômicos como forma de avaliação (STEINHILPER *et al.*, 2013). Aliado a expansão das impressoras 3D no âmbito industrial, e a preocupação a respeito dos aspectos econômicos e ambientais, este trabalho teve por intuito complementar a literatura ao realizar a impressão de uma mesma peça produzida por 2 materiais diferentes, o PLA e o PETG utilizando a tecnologia FDM. O método ACV foi utilizado para realizar a mensuração do desempenho ambiental, enquanto o método CCFM para o desempenho econômico dos fluxos materiais e energéticos. A partir dos resultados foi realizado o comparativo entre estes desempenhos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo foi comparar o desempenho ambiental, utilizando a ACV, e o econômico, utilizando a CCFM para os materiais PLA e PETG no processo de impressão 3D pela tecnologia FDM.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar os parâmetros que influenciam o processo de impressão;

- b) Levantar os dados para ACV e CCFM por meio da produção de peças com o material PLA e PETG;
- c) Avaliar o desempenho ambiental dos materiais PLA e PETG por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos;
- d) Avaliar o desempenho econômico dos materiais PLA e PETG por meio da metodologia de Contabilidade de Custos em Fluxos Materiais;
- e) Analisar e comparar os resultados de ACV e CCFM para os materiais PLA e PETG.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O estudo foi descrito a partir da fabricação de peças em Manufatura Aditiva. São várias as tecnologias que compõem a Manufatura Aditiva, aplicadas em metais, resinas, pós e polímeros. Dessa forma, foi definida a tecnologia FDM com aplicação em polímeros. Dentre os materiais existentes, foram escolhidos o PLA e o PETG. Os processos de design CAD e pós processamento não foram considerados, somente os de aquisição de material, pré-aquecimento e impressão da peça. A impressora utilizada não possui mesa aquecida e controle de nivelamento automático em sua base. Além de não possuir um invólucro que permita o isolamento do sistema de impressão e o ambiente exterior.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura desta dissertação está dividida por Capítulos, conforme segue:

- a) Capítulo 1: o início da dissertação envolve uma introdução ao tema pesquisado, além de abordar os objetivos, delimitações, justificativas e a estrutura da dissertação.
- b) Capítulo 2: aborda a revisão da literatura, tratando das tecnologias de manufatura aditiva, dos materiais utilizados, dos parâmetros de impressão e dos métodos de desempenho ambiental e econômico.
- c) Capítulo 3: trata dos materiais e métodos utilizados, descrevendo os métodos definidos e utilizados no estudo, assim como as etapas de desenvolvimento do trabalho.

d) Capítulo 4: corresponde a análise e apresentação dos resultados a partir da impressão das peças pela impressora 3D, e a simulação pelos métodos de ACV e CCFM.

e) Capítulo 5: apresenta as conclusões da dissertação, as expectativas de trabalhos futuros a serem desenvolvidos nesta área de estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo aborda assuntos relevantes de interesse para o adequado entendimento desta dissertação. Desta forma são apresentados os temas Manufatura Aditiva (2.1), Modelagem por fusão e deposição (2.2), O PETG e o PLA na tecnologia FDM (2.3), Parâmetro de Processo (2.4), Desempenho Ambiental utilizando a ACV (2.5) e Desempenho Econômico utilizando a CCFM (2.6).

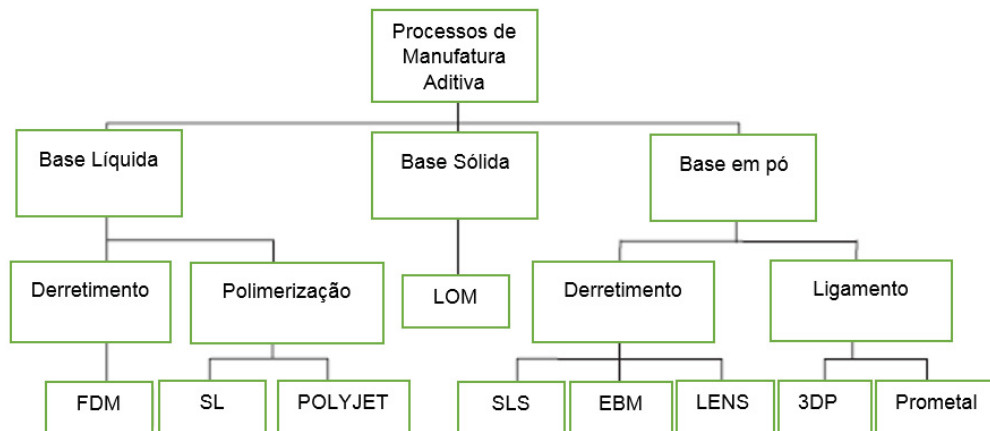
2.1 MANUFATURA ADITIVA

A Manufatura Aditiva baseia-se na construção de uma peça camada a camada a partir de um modelo CAD, matéria-prima e máquinas apropriadas. Há a presença de inúmeras tecnologias ligadas a Manufatura Aditiva, desde a extrusão de um filamento à deposição de um aglutinante sobre uma camada de pó. Estas tecnologias diferem-se entre si dependendo da matéria-prima a ser utilizada e o processo de aglomeração (laser, luz ou líquido) (KRIMI *et al.*, 2017).

Gibson *et al.* (2014) definem a Manufatura aditiva como um termo formalizado do que antes era denominado de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*), e que é chamado comumente de Impressão 3D (*3D Printing*). A Prototipagem Rápida é utilizada por inúmeras empresas para descrever a produção de um protótipo antes de sua versão final ou comercialização, ou seja, um modelo base para a confecção de outros modelos antes de sua versão definitiva (GIBSON *et al.*, 2014).

Wong e Hernandez (2012) destacam a Prototipagem Rápida, criada em 1980, como a predecessora da Manufatura Aditiva, sendo a primeira forma de criar um objeto tridimensional a partir da utilização do CAD. A Manufatura Aditiva pode ser dividida quanto aos seus processos de fabricação conforme descritos na Figura 1. O critério utilizado para sua classificação será conforme a utilização de uma base líquida, base sólida ou base de pó.

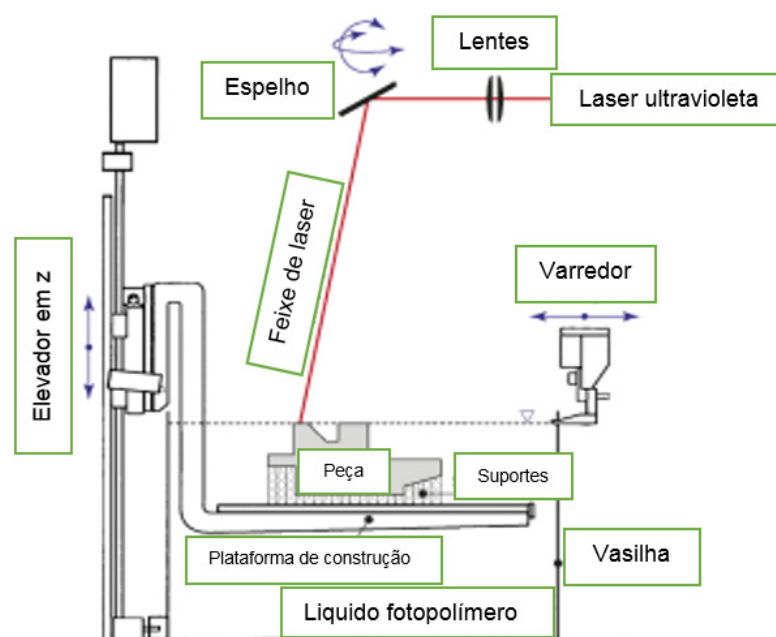
FIGURA 1: PROCESSOS DE FABRICAÇÃO EM MANUFATURA ADITIVA



FONTE: Adaptado de Wong e Hernandez (2012)

O processo de SL (*Stereolithography*) é baseado na polimerização de uma resina fotossensível, no qual um modelo CAD 3D é convertido em um arquivo de formato STL. A plataforma é elevada até seu topo e um laser ultravioleta é utilizado para curar a resina, transformando-a em uma camada sólida, a seguir a plataforma desloca-se para baixo e uma nova camada é construída em seu topo, conforme descrito na Figura 2 (CALIGNANO, 2017).

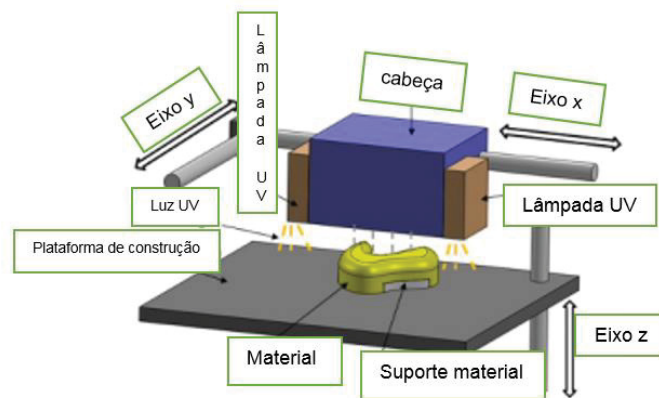
FIGURA 2: PROCESSO E COMPONENTES DA TECNOLOGIA STEREOLOGRAPHY



FONTE: Adaptado de Calignano (2017)

A tecnologia *Polyjet* consiste na construção de peças, camada por camada, pela junção da tecnologia jato de tinta e fotopolimerização, conforme visualizado na Figura 3. A primeira etapa definida como pré-processamento determina a melhor orientação da peça em relação a mesa de fabricação. Em seguida gotas de resina são depositadas na mesa por uma cabeça de impressão, sendo curadas camada a camada por uma luz ultravioleta. A mesa move-se para baixo até a finalização da peça.

FIGURA 3: PROCESSO E COMPONENTES DA TECNOLOGIA POLYJET



FONTE: Adaptado de Udroui e Braga (2017)

No processo EBM (*Electron Beam Melting*), um feixe de elétrons de alta potência é utilizado como fonte de energia ao invés de um laser, de acordo com a Figura 4. Devido a densidade de energia ser superior aos equipamentos a laser, e seu controle a partir de bobinas eletromagnéticas, há a possibilidade de maior capacidade de fusão de material, alavancando sua produtividade, quando comparado a equipamentos a laser (CALIGNANO, 2017).

Diagrama esquemático de uma máquina de deposição por feixe de elétrons (EBF). O diagrama mostra a estrutura vertical da máquina, com o feixe de elétrons (FEIXE DE ELÉTRONS) sendo direcionado para o depósito de pó (DEPOSITO DE PÓ) dentro da câmara a vácuo (CAMARA A VACUO). O feixe é gerado pelo filamento (FILAMENTO) na coluna de feixe de elétrons (COLUNA DE FEIXE DE ELÉTRONS). O feixe passa por lentes de astigmatismo (LENTE DE ASTIGMATISMO), lentes de foco (LENTE DE FOCO) e lentes de deflexão (LENTE DE DEFLEXÃO). O feixe é então direcionado para o depósito de pó, que está sobre uma base (BASE) e um rodo (RODO). O depósito de pó é protegido por um protetor de calor (PROTECTOR DE CALOR). A máquina é montada sobre uma plataforma de construção (PLATAFORMA DE CONSTRUÇÃO) dentro de um tanque de construção (TANQUE DE CONSTRUÇÃO).

- COLUNA DE FEIXE DE ELÉTRONS
- FILAMENTO
- LENTE DE ASTIGMATISMO
- LENTE DE FOCO
- LENTE DE DEFLEXÃO
- PROTECTOR DE CALOR
- CAMARA A VACUO
- FEIXE DE ELÉTRONS
- DEPOSITO DE PÓ
- DEPOSITO DE PÓ
- RODO
- PÓ
- BASE
- TANQUE DE CONSTRUÇÃO
- PLATAFORMA DE CONSTRUÇÃO

Para tecnologia LENS (*Laser Engineered Net Shaping*), uma peça é fabricada a partir da injeção de pó metálico fundido em um local pré-determinado, segundo a Figura 5. Este pó é fundido com um raio laser de alta potência, e todo o processo ocorre em uma câmara fechada de argônio.

A tecnologia PROMETAL tem por objetivo a construção de ferramentas de injeção e matrizes. Seu processo ocorre quando jatos de um aglutinante líquido são lançados ao pó de aço inoxidável. O processo 3DP ou *3D Printing* é uma tecnologia licenciada pelo MIT na qual um aglutinante a base de água é jorrado em um pó a base de amido, para imprimir dados de um desenho CAD. Por fim, o LOM (*Laminated Object Manufacturing*) é um processo que combina técnicas aditivas e subtrativas. A matéria-prima está no formato de folha e suas camadas são unidas a partir de pressão e calor usando um revestimento de adesivo térmico (WONG e HERNANDEZ, 2012).

Outra tecnologia que ganha popularidade devido ao seu curto tempo de ciclo, alta precisão dimensional, fácil utilização e integração com diferentes softwares é a tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*) (BOPARAI *et al.*, 2016). Os benefícios desta tecnologia proporcionam a concorrência com outros métodos tradicionais em aplicações específicas, dessa forma atraindo a atenção para a pesquisa (HUANG e SINGAMNENI, 2015).

2.2 MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO

A tecnologia de modelagem por fusão e deposição (FDM) caracteriza-se pela construção de um modelo camada a camada a partir da extrusão de filamento termoplástico pela movimentação de um bocal (MOHAMED *et al.*, 2017). Esta tecnologia criada pela Stratasys (2017) utiliza termoplásticos de engenharia de alta performance tais como o policarbonato (PC), acrilonitrilabutadieno estireno (ABS), blenda de PC-ABS, polifenilsulfona (PPSF) e Nylon-12 na construção de protótipos funcionais em três dimensões (MOHAMED *et al.*, 2017; GIBSON *et al.*, 2014; TSOUKNIDAS, 2011).

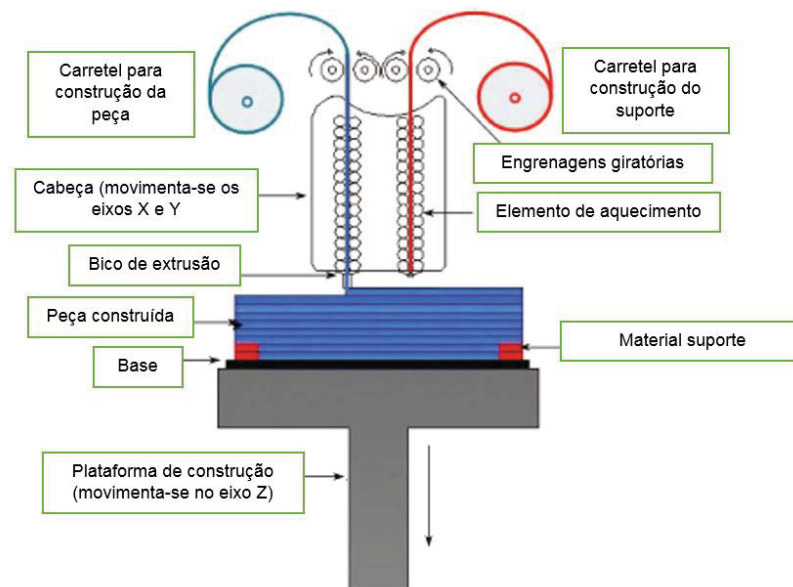
Na Figura 6 é ilustrado o processo de funcionamento da tecnologia FDM. Há a presença de 2 carretéis de filamentos (*build material spool* e *support material spool*), sendo o primeiro responsável por estocar o filamento que a peça será constituída e o segundo pelo material que irá auxiliar no suporte da peça no decorrer da impressão. As engrenagens giratórias (*drive wheels*) são utilizadas para transportar o material para dentro da cabeça (*liquefier head*), este último responsável pela movimentação nos eixos x e y. Dentro da cabeça há a presença de elementos de aquecimento (*heating element*) que transformará o material sólido em semi-líquido, para ser posteriormente expulsos pelos bicos de extrusão (*extrusion nozzles*). Dessa forma a

peça é construída em uma base (*foam base*), juntamente ao suporte, com o auxílio da plataforma que se movimenta no eixo z (*build platform*) e determina a altura da peça construída (MOHAMED *et al.*, 2015).

Gibson *et al.* (2014) definem o processo de impressão pela tecnologia FDM pelas atividades:

- a) Atividade 1: Conceitualização e CAD;
- b) Atividade 2: Conversão para STL/ AMF (*Additive Manufacturing file*);
- c) Atividade 3: Transferência para máquina de Manufatura Aditiva, manipulação de arquivo;
- d) Atividade 4: Configurar a máquina;
- e) Atividade 5: Construção;
- f) Atividade 6: Remoção e limpeza;
- g) Atividade 7: Pós-processamento;
- h) Atividade 8: Aplicação.

FIGURA 6: ESQUEMA DO PROCESSO DE IMPRESSÃO



FONTE: Adaptado de Mohamed (2015)

A área de prototipagem tem utilizado principalmente a tecnologia FDM, devido a melhorias graduais em materiais e processos, sua gama de aplicações aumentou, especialmente para o uso direto como peças acabadas. Ao produzir peças para uso direto, muitas características são exigidas para que se cumpram seus objetivos

funcionais (HUANG e SINGAMNENI, 2015). Mohamed *et al.* (2015) realizaram uma revisão na qual são descritos os estudos realizados para determinar os parâmetros que afetam as características desejadas da peça em estudo. As propriedades mecânicas, acuracidade dimensional, comportamento do material e rugosidade de superfície são exemplos de características de interesse e aperfeiçoamento na utilização desta tecnologia.

Mohamed *et al.* (2017) realizaram um estudo na qual destacam a importância de se produzir peças com enfoque em sua superfície de contato, por afetar diretamente o desempenho em aplicações de engenharia.

Esta tecnologia possui uma grande variedade de materiais disponíveis, e podem ser classificadas em materiais padrão e materiais de aplicações específicas. Dentre os materiais considerados padrão podem ser citados o PLA e o ABS (BOPARAI *et al.*, 2016).

2.3 O PETG E O PLA NA TECNOLOGIA FDM

A tecnologia FDM utiliza os termoplásticos PLA, ABS (acrilonitrila butadieno-estireno), ABSi (acrilonitrila-butadieno-estireno-biocompatível), PPSF (polifenil sulfona), policarbonato (PC) e PETG para a fabricação de várias peças que são extensivamente utilizados em várias aplicações de engenharia e comerciais para a produção de modelos conceituais, protótipos funcionais, peças de uso final e auxiliares de fabricação, como gabaritos e acessórios, ferramental composto e padrão para fundição de metal (VERMA E CHATURVEDI, 2018). O PLA é considerado um material biodegradável, absorvível e biocompatível, sendo possível a fabricação de diferentes objetos, dentro deles dispositivos biomédicos (HAMAD *et al.*, 2015). O PLA, um poliéster termoplástico possui em sua formação uma função mista (ácido carboxílico e álcool), sendo originário de fontes renováveis tais como: milho, mandioca, beterraba, e por consequência não produzem nenhum tipo de resíduo tóxico (BIOFABRIS, 2014).

Abreu (2015) destaca algumas vantagens da utilização do PLA, sendo que este material pode ser impresso sob uma superfície fria, com uma velocidade de impressão alta, além do caráter estético, produzindo peças com superfície lisa, maior detecção de detalhes e brilhante. Em contrapartida cita o fato deste material possuir baixa resistência térmica ao ser submetida a elevadas temperaturas. Bose *et al.*

(2017) destacam a utilização do PLA em aplicações biomédicas, assim como as variações a partir da mistura de PLA e PGA (ácido poliglicólico) gerando o copolímero PLGA (Poli(Ácido láctico-co-ácido glicólico)).

Diversos estudos demonstram a preocupação em utilizar os produtos gerados pela manufatura aditiva em produtos finais, não somente em prototipagem. Para averiguar sua viabilidade, estudos referentes a parâmetros de processo são muito abordados na literatura, devido ao elevado número de parâmetros que influenciam as características finais do produto final (JEREZ-MESA *et al.*, 2017).

O PETG é um termoplástico variante do PET (polietileno tereftalato), comumente utilizado na impressão 3D. O “G” significa “modificado por glicol”, na qual o resultado é um filamento mais claro, menos frágil e mais fácil de utilizar que sua forma básica, o PET (ALL3DP, 2018). Castanheira (2016) define o PETG como um material de fácil impressão, que não possui grandes problemas de adesão na mesa. Outra característica do PETG é seu caráter higroscópico, sendo que absorve a umidade do ar, e torna-se pegajoso durante a impressão, o que contribui para uma boa adesão entre as camadas da peça produzida (ALL3DP, 2018).

2.4 PARÂMETRO DE PROCESSO

Os requisitos de alta qualidade das peças, elevada taxa de produtividade, baixo custo de fabricação são essenciais para se atender as necessidades e a satisfação do cliente. As condições de processo para tecnologia FDM precisam ser estabelecidas a cada aplicação para se atingir tais objetivos. A seleção dos parâmetros de processo desempenha papel importante para garantir a qualidade dos produtos, precisão dimensional e evitar desperdícios de materiais e reduzir os custos de produção (MOHAMED *et al.*, 2015).

Os parâmetros de processo são características de controle necessários para definir a execução de atividades de um processo. Anitha *et al.* (2001) relatam que a importância da qualidade de um protótipo é decorrência de vários parâmetros, e enfatizam a tentativa no passado da realização de análises sistemáticas de erros e qualidade em protótipos. Sahu *et al.* (2013) destacam a relevância em se conhecer os parâmetros de processo que impactam na resposta de uma determinada característica. Comumente estes parâmetros são definidos a partir da experiência dos usuários, ou se referem a um manual da máquina, não certificando que estes

parâmetros resultem em uma combinação ótima para uma máquina FDM e o ambiente na qual esteja inserido (SAHU *et al.*, 2013).

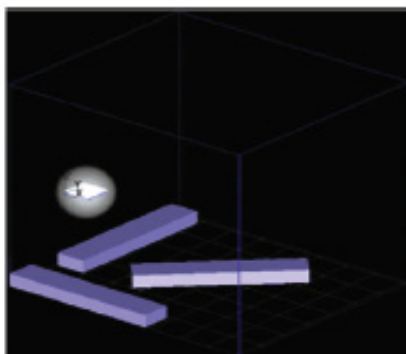
As propriedades que envolvem a estrutura dos polímeros tornam o processo FDM complexo ao almejar as características desejáveis dos produtos, independente do avanço de novos materiais para esta tecnologia. Destaca-se a importância de uma configuração adequada dos parâmetros para atingir as características desejadas de um produto e a constante melhoria a ser efetuada no processo durante seu processo de fabricação (MOHAMED *et al.*, 2017).

Kuo *et al.* (2017) descrevem a importância que a qualidade desempenha em produtos finais em uma produção em massa, e muito dos parâmetros que impactam no processo FDM, tais como:

- a) Espessura da camada (*layer thickness*);
- b) Diâmetro do bico (*nozzle diameter*);
- c) Temperatura do envelope (*envelope temperature*);
- d) Temperatura de extrusão (*extrusion temperature*);
- e) Velocidade de extrusão (*extrusion velocity*);
- f) Número de intervalos de enchimento (*number of filling interval*);
- g) Velocidade de enchimento (*filling velocity*);
- h) Padrão de enchimento (*filling pattern*);
- i) Compensação da largura do fio (*wire-width compensation*);
- j) Tempo de atraso de alimentação (*feeding delay time*);
- k) Tempo de atraso de parada de filamento (*filament stopping delay time*).

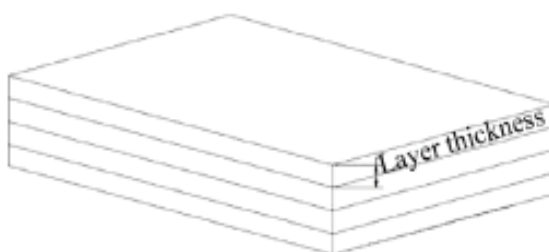
Mohamed *et al.* (2015) descrevem a importância em adequar os parâmetros de processo para atender aos requisitos de qualidade da peça. Destacam a dificuldade em determinar os parâmetros ideais do processo, devido a uma grande quantidade de parâmetros conflitantes que influenciam nas propriedades dos materiais. Nas Figuras 7 e 8 são ilustrados os parâmetros que influenciam o processo FDM.

FIGURA 7: ORIENTAÇÃO DE CONSTRUÇÃO IMPRESSÃO DE UMA PEÇA



FONTE: Mohamed *et al.* (2015)

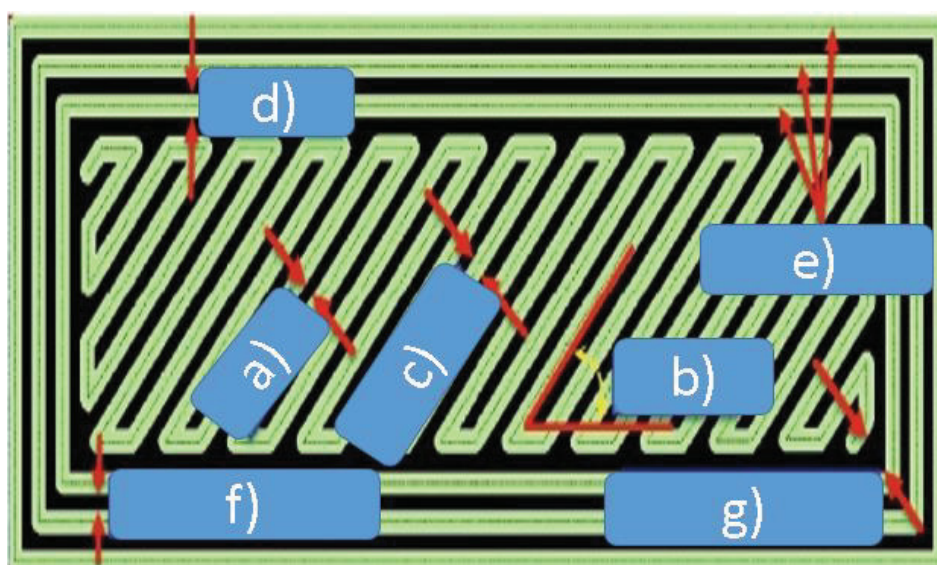
FIGURA 8: ESPESSURA DE CAMADA NA CONSTRUÇÃO DA PEÇA



FONTE: Mohamed *et al.* (2015)

Na Figura 9 são definidos alguns parâmetros no momento que a impressora percorre o caminho de impressão (MOHAMED *et al.*, 2015).

FIGURA 9: CAMINHO DA IMPRESSÃO EM FDM



FONTE: Adaptado de Mohamed *et al.* (2015)

- a) *Air gap* (vazio): refere-se ao espaço entre um filamento e outro na mesma camada;
- b) *Raster angle* (ângulo em relação ao eixo x): refere-se ao ângulo entre a camada e o eixo X, este parâmetro é importante em partes com curvas pequenas. Pode variar entre 0 e 90 graus;
- c) *Raster width* (largura do filamento quando depositado): largura do filamento quando depositado, uma maior largura implica em uma parte interior robusta, um menor valor exigirá menor tempo de produção e material. Este parâmetro varia de acordo com o tamanho do bocal;
- d) *Contour width* (largura do contorno): refere-se a largura do filamento que contorna a peça;
- e) *The number of contours* (número de contornos): refere-se ao número de contornos em torno da curva da parte externa e interna, contornos adicionais melhoram as paredes externas;
- f) *Contour to contour air gap* (espaço entre contornos): refere-se ao espaço entre os contornos;
- g) *Perimeter to raster air gap* (espaço entre contorno interno e borda): refere-se ao espaço entre o contorno mais interno e a borda de preenchimento dentro do contorno.

2.4.1 Precisão dimensional

A tecnologia FDM é uma tecnologia de manufatura aditiva que pode construir peças complexas em um menor tempo com a mínima intervenção humana. Os parâmetros de processo como espessura de camada (*layer thickness*), orientação (*orientation*), ângulo em relação ao eixo x, largura do filamento quando depositado e o vazio influenciam a precisão dimensional e podem ser expressos em mudança de comprimento, largura e espessura (KUMAR e REGALLA, 2012).

Dixit *et al.* (2016) realizaram experimentos em 2 máquinas de modelagem por fusão e deposição, sendo uma delas a impressora 3D e outra de código aberto de baixo custo, para verificar sua influência na precisão dimensional. Foi observado que na máquina de modelagem por fusão e deposição a largura do filamento quando depositado, altura de fatia (*slice height*) e diâmetro do bico são parâmetros que mais influenciam na precisão dimensional. O método experimental de Taguchi foi utilizado

para definir o nível ideal dos parâmetros para minimizar a sua variação percentual no comprimento, o comprimento em si e sua altura. Os resultados observados demonstram que há diferentes níveis de parâmetros ideais para cada característica resposta (variação percentual de comprimento, comprimento e altura).

Mohamed *et al.* (2016) realizaram estudos envolvendo seis parâmetros de processos que influenciam a precisão dimensional: a espessura de camada, vazio, ângulo em relação ao eixo x, orientação de construção (*build orientation*) e número de contornos. Zhang e Peng (2012) procuram otimizar os parâmetros de compensação de largura do fio, velocidade de extrusão, velocidade de enchimento e espessura de camada para averiguar o erro dimensional e o empenamento das peças em estudo.

2.5 DESEMPENHO AMBIENTAL UTILIZANDO A ACV

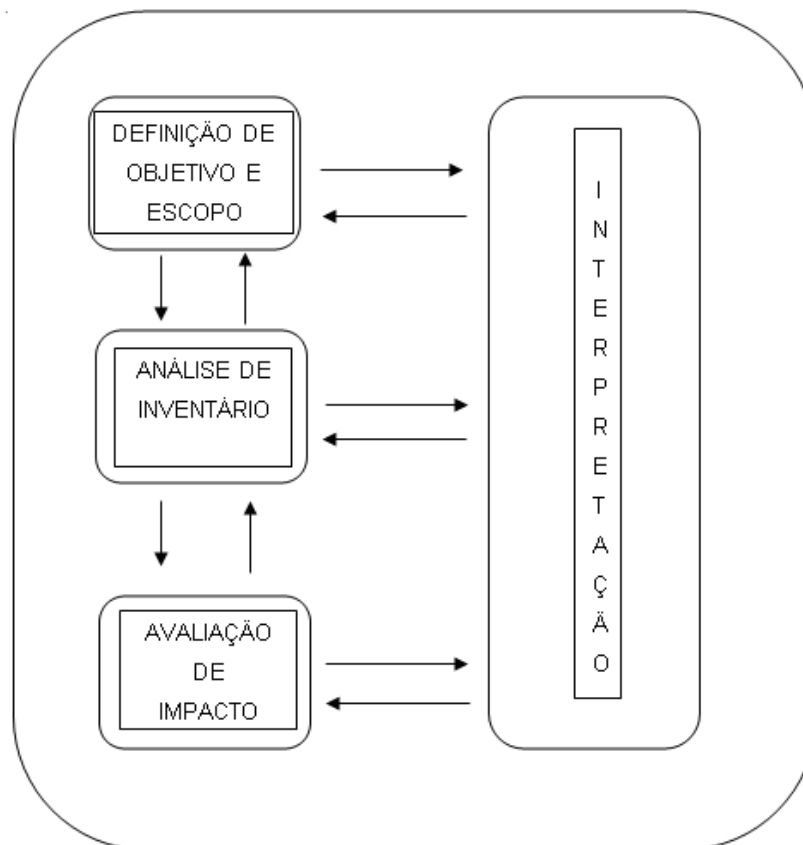
A conscientização da sustentabilidade da impressão 3D tem recebido atenção gradualmente. Alguns pontos precisam ser abordados para a avaliação de sustentabilidade ambiental desta tecnologia. Os processos de impressão 3D, considerados instáveis, apresentam muitos fatores que afetam seu impacto ambiental final como as configurações de parâmetros e as próprias impressoras. A ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) pode ser utilizada para se obter uma conclusão expressiva de maneira quantitativa ao delinear os impactos ambientais da impressão 3D (LIU *et al.*, 2016). A vantagem da construção de uma peça de alta complexidade, sem o custo adicional envolvido desencadeia questões intrigantes para a ACV, principalmente de o consumo de energia aumentar devido à complexidade do material e quais são as influências no produto final gerado (REJESKI *et al.*, 2017).

A ACV surgiu como um método capaz de avaliar os impactos sobre a diminuição de recursos, saúde humana e ecossistema de um produto, processo ou sistema, devido a uma visão que engloba todas as atividades de um processo, desde a aquisição de matérias-primas ao descarte final (REJESKI *et al.*, 2017). A NBR ISO 14044: 2009 detalha as etapas integrantes do ciclo de vida do produto, sendo definido como aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem e disposição final.

As fases que determinam os estudos de ACV são definidas por fase de definição de Objetivo e Escopo, Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e Interpretação. Outro estudo similar, o

estudo de ICV, é definido pela exclusão da etapa de AICV, sendo necessária somente uma análise de inventário e uma interpretação (ABNT NBR ISO 14044, 2009). A Figura 10 define as etapas para realização do estudo ACV.

FIGURA 10: ETAPAS DA ACV



FONTE: ABNT NBR 14044 (2009)

2.5.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo de uma ACV define a aplicação pretendida, as razões para a execução do estudo e o público alvo (interessados nos resultados a serem divulgados). A definição do escopo assegura uma abrangência, profundidade e o detalhamento da pesquisa para atender ao objetivo traçado, seguindo alguns itens (ABNT NBR ISO 14044, 2009):

- Sistema de produto de estudo;
- Funções do sistema de produto;
- Unidade Funcional;

- Fronteira do sistema;
- Procedimentos de alocação;
- Categorias de impacto, metodologia de avaliação;
- Requisitos de dados;
- Pressupostos;
- Limitações;
- Requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados;
- Revisão crítica, se aplicável;
- Tipo e formato do relatório para o estudo.

2.5.1.1 Função, unidade funcional e fluxos de referência

A função é definida a partir da seleção do objeto e escopo, pois um sistema pode conter várias possibilidades de funções. A unidade funcional caracteriza a quantificação das funções identificadas do produto, tendo por objetivo fornecer a referência à qual as entradas e saídas são relacionadas. A determinação da referência é necessária para assegurar a comparação dos resultados de ACV. O fluxo de referência determina a quantidade de produtos necessária para desempenhar a função, de acordo com cada sistema de produto estudado (ABNT NBR ISO 14044, 2009).

2.5.1.2 Fronteira do sistema

A fronteira do sistema define os processos a serem considerados no sistema. A partir da determinação do objetivo, escopo, aplicação pretendida e público-alvo, são definidos os elementos do sistema físico a ser modelado para obter o grau de confiança nos resultados e a possibilidade de atingir seu objetivo. A quantificação das entradas e saídas que não alteram de forma significativa o estudo e podem ser desconsiderados, mas convém que critérios sejam estabelecidos claramente e descritos na realização do estudo (ABNT NBR ISO 14044, 2009). Definidas as fronteiras do sistema, é adequado que os estágios do ciclo de vida, processos elementares e fluxos sejam determinados, tais como:

- Aquisição de matérias-primas;

- Entradas e saídas na cadeia principal de manufatura;
- Produção e uso de combustíveis, eletricidade e calor;
- Disposição final de resíduos de processos e de produtos;
- Recuperação de produtos usados (reuso, reciclagem)
- Manufatura de materiais auxiliares;
- Operações adicionais, como iluminação e aquecimento.

2.5.2 Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)

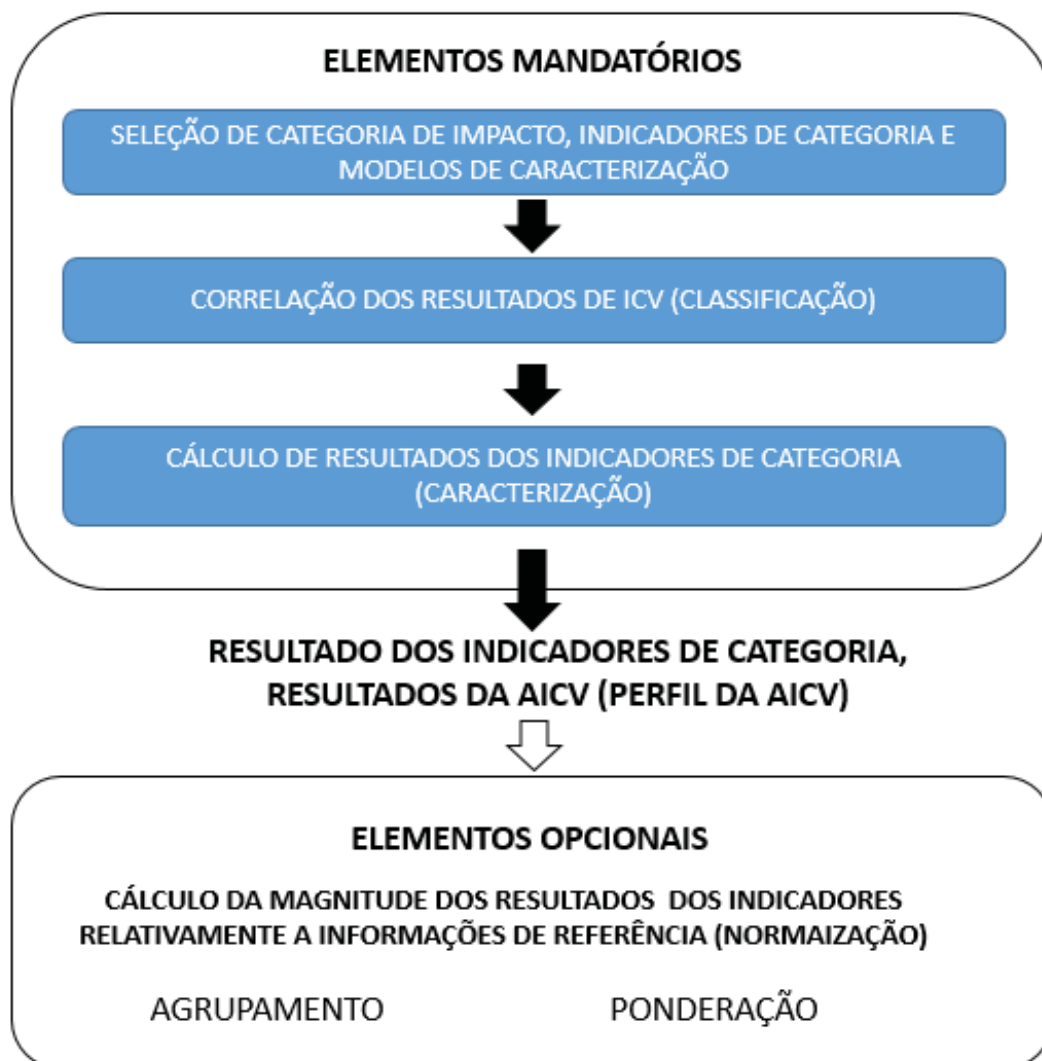
A ICV corresponde a coleta de dados e o procedimento de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto. Esta análise tem caráter iterativo, na medida em que ocorre a coleta de dados, amplia-se o conhecimento sobre o sistema, de forma a influenciar nos procedimentos de coleta de dados e em certos casos revisões de objetivo ou o escopo de estudo (ABNT NBR ISO 14044, 2009).

A coleta de dados pode ser classificada de acordo com as entradas de energia, matéria-prima, entradas auxiliares, produtos, resíduos, emissões atmosféricas, descargas para água e solo além de outros aspectos ambientais. O procedimento de cálculo envolve a validação dos dados coletados, correlação aos processos elementares e a correlação dos dados aos fluxos de referência e à unidade funcional, para elaborar os resultados de inventário do sistema definido (ABNT NBR ISO 14044, 2009).

2.5.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A etapa de AICV estuda a significância dos impactos ambientais potenciais a partir dos resultados da ICV. Esta fase associa os dados de inventário às categorias de impacto e indicadores específicos, fornecendo dados para a interpretação do ciclo de vida. A AICV possui a limitação de não focar uma avaliação completa de todas as questões ambientais do sistema de produto em estudo, mas somente as questões ambientais que foram definidas no objetivo e escopo. Os componentes do estágio da AICV são definidos pela Figura 11.

FIGURA 11: COMPONENTES DO ESTÁGIO DA AICV



FONTE: ABNT NBR ISO 14044 (2009).

Os resultados da AICV possuem incertezas relacionadas a falta das dimensões espacial e temporal nos resultados da ICV, e não existem metodologias amplamente aceitas que possam correlacionar de forma precisa dados de inventário com impactos ambientais específicos, devido as categorias de impacto estarem em estágios distintos de desenvolvimento (ABNT NBR ISO 14044, 2009).

2.5.4 Interpretação dos resultados obtidos nas fases de ICV ou AICV

A interpretação da ACV é o estágio em que são realizadas as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto em conjunto, para fornecer

resultados consistentes com o objetivo e tomar a forma de conclusões e recomendações aos tomadores de decisão. A interpretação dos resultados de AICV é baseada em uma abordagem relativa, que apontam efeitos ambientais potenciais e não predizem impactos reais sobre pontos finais de categoria, extrapolação de limites, margens de segurança ou riscos (ABNT NBR ISO 14044, 2009).

2.5.5 Estudos existentes de ACV e Manufatura Aditiva

Kellens *et al.* (2017) avaliaram dados do ICV e compararam os impactos causados pelas diversas tecnologias de manufatura aditiva existentes, dentre essas a Modelagem por Fusão e Deposição. Em relação ao impacto, o desempenho ambiental foi tratado como uma comparação direta entre eficiência energética gerada entre as tecnologias de manufatura aditiva (BAUMERS *et al.*, 2011).

Mognol *et al.* (2006) investigaram a demanda de energia consumida entre 3 diferentes tecnologias: *Thermojet*, FDM e ECOS. No processo de prototipagem rápida, foram definidos 3 níveis para classificar a influência de cada parâmetro de processo. O tempo de produção da peça foi um fator importante que contribuiu com o consumo de energia, sendo o consumo praticamente constante durante o período de impressão. Ao definir-se parâmetros bons de processo, a economia de consumo de energia elétrica pode chegar a 61 % para a tecnologia FDM.

Luo *et al.* (1999) demonstraram um método para averiguar a performance ambiental de sólidos fabricados livremente. Foi realizada a divisão de cada parte do processo como uma fase de vida, e analisada separadamente, sendo que no final os efeitos foram combinados para se produzir a performance do processo. As características consideradas para tal análise envolviam as respectivas tecnologias, material, consumo de energia, descartes de processo e disposição, sendo esta comparação efetuada entre as três diferentes tecnologias de manufatura aditiva: SL SLS e FDM.

Baumers *et al.* (2011) realizaram a produção de uma mesma peça com as diversas tecnologias de manufatura aditiva, analisando seu consumo energético. O intuito da pesquisa foi demonstrar resultados consistentes e confiáveis sobre o consumo de energia no processo de fabricação. Devido a diferenças de material de construção, espessura de camada, propriedades mecânicas e acabamento

superficial, as informações geradas não são úteis para tratar de comparações diretas entre as tecnologias testadas.

Song e Telenko (2017) realizaram um estudo ao verificar a quantidade de material descartado quando ocorre um erro de impressão. Utilizou-se o ICV para combinar dados de desperdício de material e consumo de energia, e detectou-se que o consumo de energia atual era 50% maior do que em condições ideais. Os trabalhos iniciais relativos a ACV têm se concentrado principalmente na questão do consumo energético. Pesquisas recentes englobam não somente o consumo energético como fator determinante de uma ACV, mas critérios como consumo de material, outras categorias de impacto ambiental e diferentes máquinas são abordados (REJESKI *et al.*, 2017).

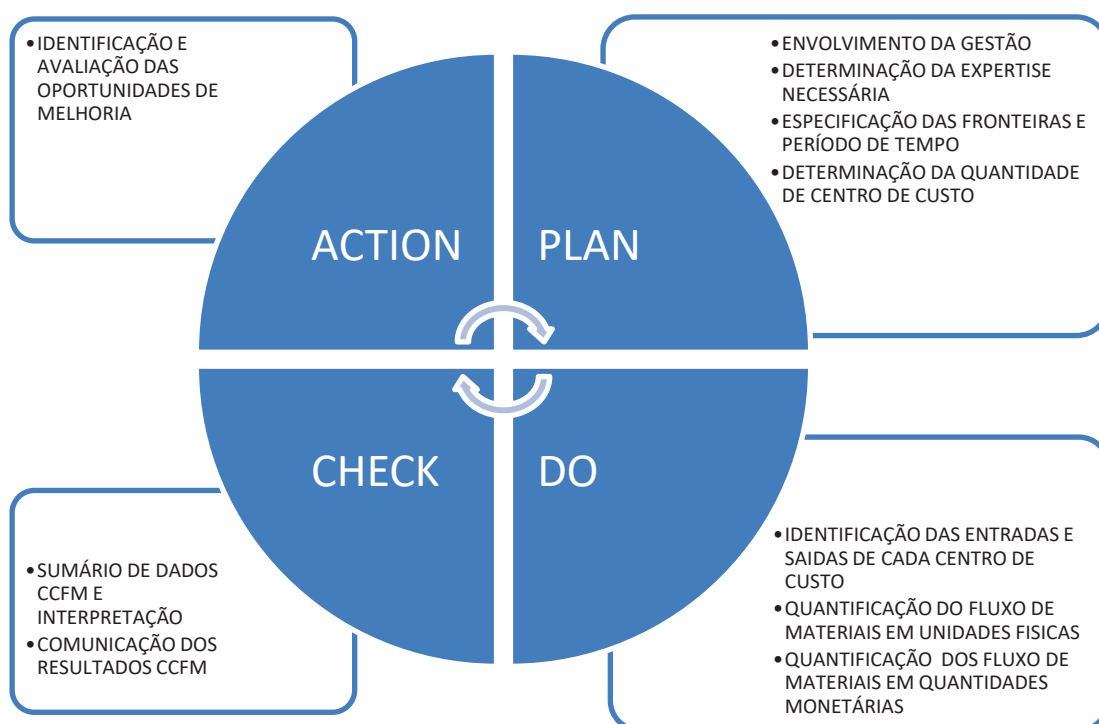
2.6 DESEMPENHO ECONÔMICO UTILIZANDO A CCFM

A ISO 14051: 2013 define a CCFM como uma ferramenta de gerenciamento que auxilia as organizações a compreender os impactos ambientais e financeiros devido ao uso de material e energia, e visa procurar melhorias tanto ambientais quanto financeiras para estas práticas. O aumento de transparência gerado por tal ferramenta identifica o fluxo de materiais e uso de energia, e os custos envolvidos nestas, além de comparar os custos associados aos produtos e os referentes custos de perda de material, por meio de resíduos (ISO 14051, 2013).

O MFCA (*Material Flow Cost Accounttting*), sigla em inglês para CCFM tem como objetivo identificar possíveis melhorias de ganho monetário, evitando assim os desperdícios desnecessários, substâncias residuais e emissões, em resumo de todos os materiais e energia não produtivos (ISO 14051:2013). Schmidt (2014) destacou o CCFM pelo motivo de não somente mostrar os custos diretos de resíduos (perda), mas a perda de valor dentro da empresa, incluindo os custos de material, mão-de-obra e capital. Kasemset *et al.* (2015) tiveram por objetivo realizar um estudo em redução de resíduos numa fábrica têxtil na Tailândia. Seguindo um procedimento CCFM foi selecionado um produto e mensurado os custos positivos e negativos envolvidos em cada processo de fabricação. A partir dos dados coletas, foram realizadas melhorias e um diagrama de causa e efeito foi aplicado para identificar a principal causa do custo negativo, e propor soluções para redução destes custos.

A implementação da CCFM pode ser realizada mesmo que não exista um sistema de gestão ambiental (SGA) implantado. A CCFM pode fornecer informações significativas nos diversos estágios de um ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Action*). As informações retiradas podem contribuir para o conhecimento de impactos ambientais e financeiros, o que aumenta a qualidade da avaliação, auxiliando na tomada de decisões dentro de uma organização (ISO 14051, 2013). A Figura 12 mostra as etapas de implementação da CCFM.

FIGURA 12: ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO DA CCFM



FONTE: ABNT NBR 14051 (2013)

Na fase de planejamento (*PLAN*) o envolvimento da gestão está relacionado às atividades de liderar a implementação, designar responsáveis, monitorar o progresso e rever os resultados da implementação de uma CCFM. A determinação da expertise está ligada aos diversos profissionais que detêm informações que contribuam para a análise, dentre eles a expertise operacional, engenharia, controle de qualidade, ambiental e contábil. A especificação da fronteira e período de tempo está definida como a área que será analisada, podendo abranger um único processo, instalação ou uma cadeia de suprimentos. A determinação dos Centros de Custo (CC)

estão relacionados as etapas envolvidas dentro da fronteira especificada, baseada a partir de informações de processo (ABNT NBR ISO 14051, 2013).

Após a fase de planejamento, na etapa de aplicação (*DO*) ocorre a identificação de entradas e saídas de cada centro de custo, sendo determinados como entradas os materiais e energia, e as possíveis saídas um produto, perda de material ou perda de energia. A partir da definição das entradas e saídas de cada Centro de Custo, ocorre a quantificação dos fluxos de materiais em unidades físicas, tais como massa, comprimento ou volume, dependendo do tipo de material. Na quantificação em unidades monetárias são definidos os custos de material, energia, sistema e da gestão de resíduos (ABNT NBR ISO 14051, 2013).

Nesta fase de aplicação, a partir dos dados levantados, é possível determinar indicadores de valor agregado ao produto ou as perdas em resíduos, conforme as equações citadas em Schmidt (2014):

$$VP_i = CMp + CMp_i + CEp + CSp \quad (1)$$

$$mp_j.VP_i = \sum_j P_{ij}.QP_{ij}.mp_j + mp_i.pe.E_i.to_i + mp_i.S_i.ta_i.n_i \quad (2)$$

$$VP = \sum_i VP_i \quad (3)$$

$$VR_i = CMr + CEr + CSr + CGr \quad (4)$$

$$mr_j.VR_i = \sum_k P_{ik}.QR_{ik}.mr_j + mr_i.pe.E_i.to_i + mr_i.S_i.ta_i.n_i + mr_j.DR_{ik}.QR_{ik} \quad (5)$$

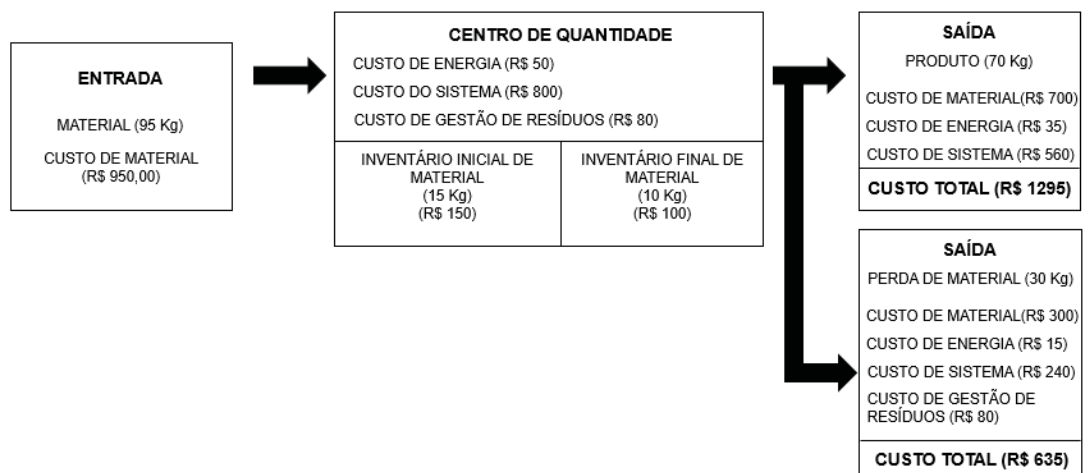
$$VP = \sum_i VR_i \quad (6)$$

CMp_i :	Custo de material no produto no CC i em R\$
CEp_i :	Custo de energia no produto no CC i em R\$
CSp_i :	Custo de sistema no produto no CC i em R\$
P_{ij} :	Preço do produto j no CC i em R\$
QP_{ij} :	Quantidade do produto j no CC i em kg
mp_j :	Massa total de material de entrada no CC i
mp_i :	Massa de material do produto j de saída no CC i
pe :	Preço unitário de energia por kW.h
E_i :	Gasto de energia no CC i em kW.h
to_i :	Tempo de operação de equipamento no CC i em h
S_i :	Custo da mão de obra em R\$/h no CC i
ta_i :	Tempo de atividade por operador em h no CC i

n_i :	Número de operadores no CC i
CMr_i :	Custo de material no resíduo no CC i
CEr_i :	Custo de energia no resíduo no CC i
CSr_i :	Custo de sistema no resíduo no CC i
CDr_i :	Custo de destino no resíduo no CC i
P_{ik} :	Preço do resíduo k no CC i em R\$
QR_{ik} :	Quantidade do resíduo k no CC i em kg
mr_j :	Massa total de resíduos de entrada no CC i
mr_i :	Massa de material de resíduo j de saída no CC i
DR_{ik} :	Custo de destino do resíduo k no CC i em R\$
QR_{ik} :	Quantidade do resíduo k no CC i em kg

A Figura 13 ilustra 1 Centro de Custo com as respectivas entradas e saídas de material. O custo de material adquirido é de R\$ 1000, custo de energia R\$ 50, custos de sistema R\$ 800 e custos de gestão de resíduos R\$ 80.

FIGURA 13: EXEMPLO DE CENTRO DE CUSTO DO CCFM



FONTE: ABNT NBR 14051 (2013)

Deste exemplo da quantidade de material de entrada (100 Kg), 70 Kg de material seguem para o produto e 30 Kg se transformam em perda de material. Dessa forma o percentual de distribuição de material, 70% para o produto e 30% para a perda de material são utilizados para alocação de custos de energia e sistema, mas estes critérios de alocação são determinados pela organização em questão. Em relação aos

custos de gestão de resíduos, são atribuídos unicamente à perda de material, pois não provêm de outra natureza (ABNT NBR ISO 14051, 2013).

A fase de verificação (*CHECK*) os dados obtidos são resumidos e expostos como matriz de custo do fluxo de material ou um diagrama de custo de fluxo de material, e posteriormente comunicados as partes interessadas. Na etapa de avaliação (*ACTION*), os resultados encontrados auxiliam a organização a compreender melhor o status do uso e perda de materiais, sendo assim podendo rever os dados e encontrar possibilidades de melhoria em relação ao desempenho ambiental e financeiro (ABNT NBR ISO 14051, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo está dividido em duas seções, 3.1 e 3.2, compreendendo o detalhamento da classificação metodológica da pesquisa e a descrição detalhada das etapas de pesquisa, respectivamente.

3.1 Classificação Metodológica da Pesquisa

A pesquisa em questão, quanto sua abordagem é considerada quantitativa, ao utilizar recursos estatísticos para mensurar os resultados de vida útil dos calibres de folga, quanto à natureza é aplicada pelo motivo de gerar conhecimentos aplicados à prática e solucionar problemas específicos na área de modelagem por fusão e deposição. Ao relacionar-se com os objetivos tem caráter explicativo, pois visa identificar fatores que explicam fenômenos, o motivo de sua ocorrência, quanto aos procedimentos técnicos pode ser considerada experimental, ao selecionar variáveis que influenciam o objeto de estudo, e suas formas de controlá-lo, conforme Quadro 1. De acordo com Gil *et al.*, (2002) uma pesquisa é considerada experimental quando consiste em definir um objeto de estudo, eleger as variáveis que são aptas a influenciar e determinar formas de controle e de investigação dos efeitos que a variável produz no objeto. A pesquisa experimental não precisa ser necessariamente realizada em laboratório, mas é necessário apresentar as seguintes propriedades:

- MANIPULAÇÃO: Pelo menos 1 das características do elemento estudado deve ser manipulável;
- CONTROLE: É necessário a introdução de 1 ou mais controles na situação experimental, criando-se um grupo de controle;
- DISTRIBUIÇÃO ALEATÓRIA: Os elementos a participar dos grupos experimentais e de controle devem ser escolhidos aleatoriamente.

A pesquisa quantitativa refere-se à tradução em números, as opiniões e informações, a fim de classificá-las e analisá-las, via utilização de recursos e técnicas estatísticas. A pesquisa aplicada tem por objetivo gerar conhecimentos para aplicação na prática, com enfoque em problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais. A pesquisa explicativa, além de identificar fatores que contribuem para ocorrência de fenômenos, aprofunda o conhecimento explicando o porquê das coisas (KAUARK *et al.*, 2010).

QUADRO 1: CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

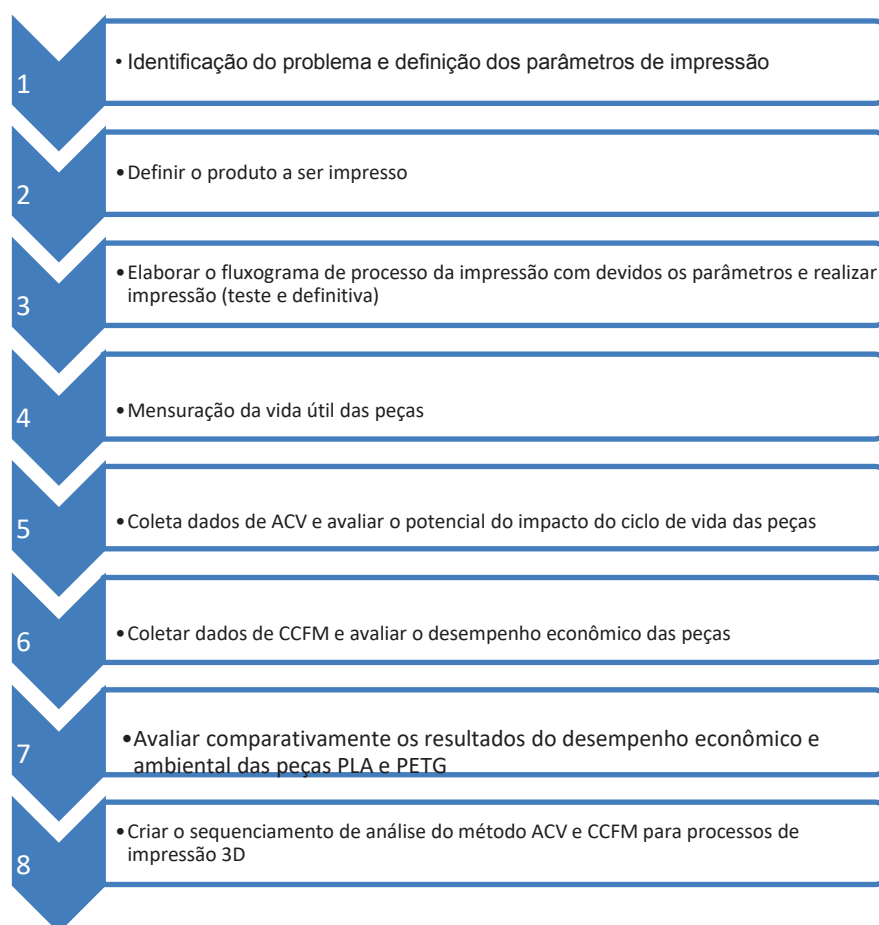
CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	
Abordagem	Quantitativa
Natureza	Aplicada
Objetivo	Explicativo
Procedimento	Experimental

FONTE: O Autor (2018)

3.2 Descrição de Etapas de Realização da Pesquisa

O fluxo de trabalho para realização desta pesquisa é apresentado na Figura 14, sendo que as etapas são detalhadas nas seções 3.2.1 à 3.2.5.

FIGURA 14: FLUXO DE TRABALHO



FONTE: O Autor (2018)

3.2.1 Identificação do problema e definição de parâmetros de impressão

O problema de pesquisa está em torno da impressão 3D com a utilização da tecnologia FDM sem a utilização de mesa aquecida, utilizando-se dos materiais PLA e PETG. A impressora utilizada neste estudo foi a Stella 1, fabricada pela empresa Boa Impressão3D. O software de Repetier Host 2.0.5 foi utilizado para hospedar os arquivos de impressão. Foi utilizado o Slic3r v1.6 para realizar o fatiamento da peça. Em relação aos parâmetros de impressão, a fabricante já possui configurações padrão que auxiliam na determinação das configurações que melhor se ajustam para cada material.

Apesar disso, foi necessário estudar na literatura os parâmetros de impressão para adequar a situação de impressão ao Caso em Estudo. A partir dos parâmetros de impressão encontrados na literatura, foram selecionados artigos que realizaram experimentos nos quais as características de controle do produto final foram a precisão dimensional e a qualidade superficial. O Quadro 2 apresenta os parâmetros de processo que influenciam as características dimensionais encontrados na literatura.

QUADRO 2: PARÂMETROS DE PROCESSO QUE IMPACTAM AS CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS

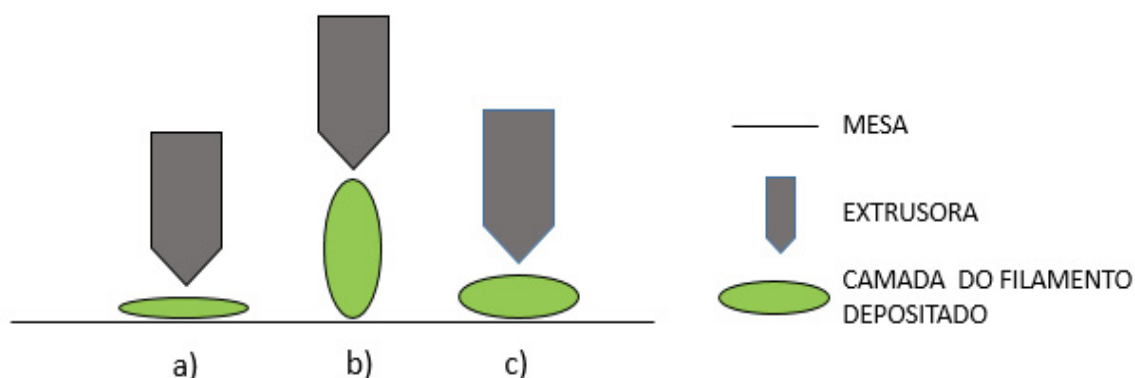
AUTORES	KUMAR E REGALA (2012)	DIXIT <i>et al.</i> , (2016)	MOHAMED <i>et al.</i> , (2016)	ZHANG E PENG (2012)
PARÂMETROS INFLUENTES	ESPESSURA DE CAMADA	DIÂMETRO DE BICO	ESPESSURA DE CAMADA	COMPENSAÇÃO LARGURA DE FIO
	ORIENTAÇÃO	ALTURA DE FATIA	VAZIO	VELOCIDADE DE EXTRUSÃO
	ÂNGULO EM RELAÇÃO AO EIXO X	LARGURA DO FILAMENTO QUANDO DEPOSITADO	ÂNGULO EM RELAÇÃO AO EIXO X	VELOCIDADE DE ENCHIMENTO
	LARGURA DO FILAMENTO QUANDO DEPOSITADO		ORIENTAÇÃO DE CONSTRUÇÃO	ESPESSURA DE CAMADA
	VAZIO		NUMERO DE CONTORNOS	

FONTE: O Autor (2019)

Foi definido como variável de controle a largura do filamento quando depositado, mantendo todas as outras variáveis como constantes. Este parâmetro foi definido devido a impressora não possuir o nivelamento automático de sua mesa, sendo necessários ajustes para determinar a altura das peças. Na impressora

utilizada esta largura do filamento é definida pelo parâmetro de Z. Este parâmetro define quanto a extrusora irá se deslocar no eixo z. Valores altos de z fazem com que a largura do filamento fique menor e valores muito baixos de z tende a achatar a camada e torna a largura de z maior. A Figura 15 ilustra este processo.

FIGURA 15: INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO Z OFFSET



FONTE: O Autor (2019)

O item a) refere-se ao esmagamento da camada quando o valor do z offset está baixo, o b) refere-se a camada quando o valor de z está alto, tendendo ao descolamento da camada e c) define-se como uma camada ideal para impressão.

3.2.2 Definição de produto de impressão

O calibre de folga é um dispositivo de medição utilizado para controlar distâncias existentes entre duas peças. O calibrador de folga, como comumente é conhecido, é utilizado na fabricação e manutenção de equipamentos automotivos, aviação, dispositivos e serviços de calibração. São lâminas de diferentes diâmetros para ajustar folgas, para viabilizar a correta montagem de conjuntos. Podem ser utilizados nos ajustes de tuchos, velas, verificação de folgas em rolamentos e engrenagens, ajustes de pistões, anéis, além de controlar a folga de diversos equipamentos (ÔMICROM, 2018). Na indústria automotiva em questão é utilizado para o controle de folga existente entre a porta e carroceria do automóvel. No processo de montagem do automóvel, a correta fixação das portas inibe a possibilidade de ocorrer falhas de qualidade, sendo o calibre de folga essencial como dispositivo para

assegurar a montagem deste conjunto. A Figura 16 exibe o calibre de folga utilizado na pesquisa.

FIGURA 16: CALIBRE DE FOLGA UTILIZADA NA PESQUISA



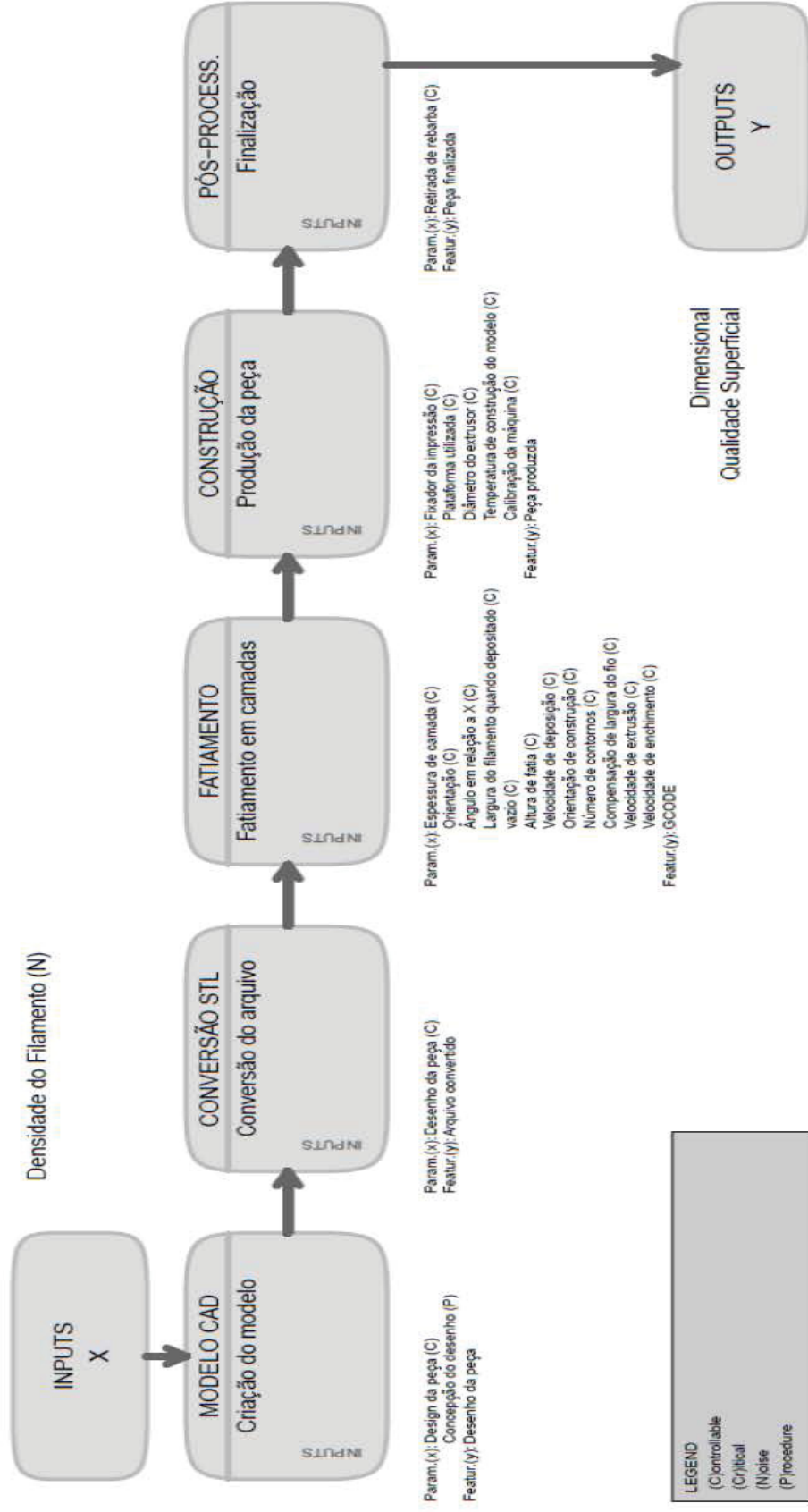
FONTE: O Autor (2018)

A construção deste calibre de folga é realizada a partir da usinagem de uma placa de POM (poliacetal) nas dimensões de espessura pré-determinados para este dispositivo. Esta pesquisa proporciona um estudo alternativo na substituição da forma de construção do dispositivo, ao utilizar recursos de manufatura aditiva no processo de construção. Na indústria automotiva, custos, tempo e qualidade são fatores que determinam a competitividade no mercado. A fabricação deste calibre envolve custos de transporte desde o fornecedor à fábrica, além do tempo de espera na realização do pedido de compra, envio de orçamento e aprovação de compra. No processo de fabricação utilizando o material POM há uma quantidade maior de sobras que são geradas, pois o processo de usinagem tende a retirar material para construção de peças, enquanto a manufatura aditiva tende a adicionar material, sendo mínimas as sobras geradas.

3.2.3 Fluxograma de impressão, Teste e Impressão definitiva

A partir dos estudos de Kumar e Rugala (2012), Dixit *et al.*, (2016), Mohamed *et al.*, (2016) e Zhang e Peng (2012), que realizaram experimentos com enfoque em características dimensionais, foi elaborado o fluxograma para o processo de impressão FDM. A estrutura foi definida a partir de uma adaptação de Gibson *et al.*, (2014), destacando as etapas do processo de impressão. Este fluxograma de impressão pode ser adaptado a outros processos de manufatura aditiva, assim como os dados de entradas e saídas e os ruídos do sistema. O software utilizado para a construção do fluxograma foi o R v3.4.3, e o código foi uma adaptação do modelo de mapeamento de processos de Cano *et al.*, (2012).

FIGURA 17: FLUXOGRAMA DE IMPRESSÃO 3D



FONTE: O Autor (2019)

A Figura 17 apresenta o fluxograma adaptado de Gibson *et al.*, (2014), em que são definidas as entradas e saídas para cada processo. O “Param (x)” determina os parâmetros que podem ser controlados na entrada de cada fase. Por exemplo: Na etapa de criação do modelo os parâmetros design da peça e concepção de produtos são parâmetros que definem uma saída, definida por “Featur (y)”, neste exemplo o desenho da peça. As letras definem o tipo de característica, sendo o (N) definido como um ruído, neste caso a densidade do filamento, pois são características externas ao processo, dependendo do material a ser utilizado. O (P) é definido como procedimento, sendo encontrado na concepção do desenho, em que para a montagem de uma peça há diversas formas de concebê-la, e procedimentos envolvidos nesta tarefa. O (Cr) é definido como crítico, não avaliado neste estudo. O (C) relaciona-se ao controlável, são parâmetros que possuem ajustes a serem realizados nas etapas.

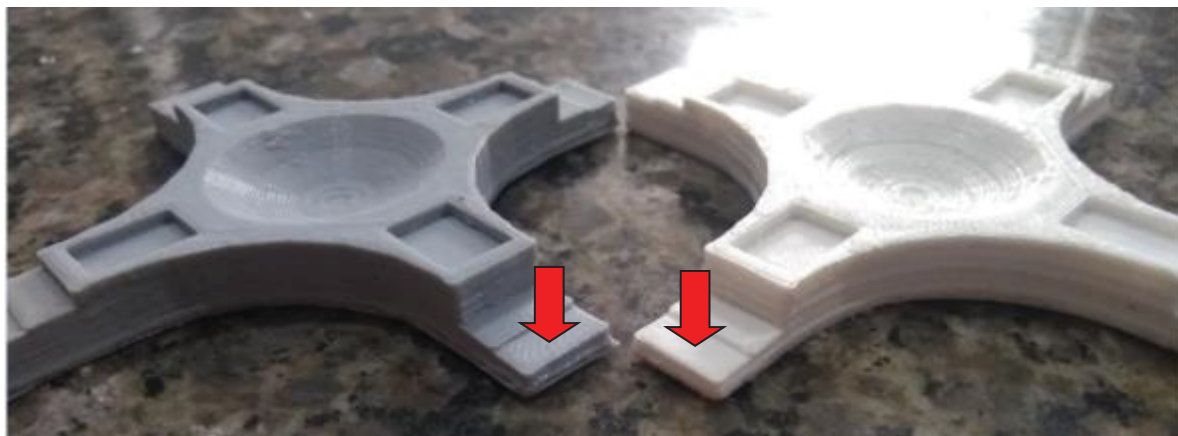
Para realização desta impressão foram utilizados os materiais PLA e PETG, com o auxílio da impressora Stella 1, conforme já citado em 3.2.1. Como a fabricante já possui configurações padrão que melhor se ajustam ao material, estes padrões foram seguidos, alterando-se somente o valor de z offset.

Os calibres de folga, para serem considerados conformes, precisam atender a especificações de espessura. As espessuras precisam estar dentro de um intervalo de tolerância, que variam entre 2,45 e 2,75 para as espessuras com nominais de 2,60 mm. Para a espessura de 3,6 mm, devem atender ao intervalo de 3,45 a 3,75. No primeiro teste foi definido o z offset em 1,2, mas o resultado em ambas as peças foi não conforme, apresentando espessura de 2,79 mm. Foram realizados testes ajustando em -0.1 mm o valor do offset, pois as camadas inferiores não saiam com a qualidade desejada. Após os testes, o z offset que apresentou a peça definitiva foi com o ajuste de 0,9 mm. Os testes de impressão foram realizados nos meses de setembro e outubro de 2018. As características da impressora e do filamento utilizado são: os filamentos utilizados para os testes possuem um diâmetro de 1,75 mm, a impressora não possui nivelamento automático de sua base e as dimensões de impressão de sua mesa são de 200x200x200 mm. Além disso foi utilizado um diâmetro de 0,4 mm para o bico da extrusora, que permite uma precisão de 0,05 mm para a altura de camada e 0,01 mm para precisão de posicionamento.

3.2.4 Mensuração da vida útil das peças

A vida útil da peça foi definida a partir de testes funcionais simulando o desgaste dos calibres de folga. Estes testes foram realizados a partir do processo de utilização de um calibre de forma sequencial, verificando em quais regiões ocorria maior desgaste desta peça. Ou seja, o calibre foi utilizado diversas vezes até que ocorresse o desgaste em que a peça era considerada não útil por estar fora da especificação técnica de uso pela indústria para executar a sua função. Assim, foi verificado que a região de maior desgaste correspondia a região com os limites de espessura entre 2,45 e 2,75 mm, conforme Figura 18:

FIGURA 18: REGIÃO COM MAIOR DESGASTE



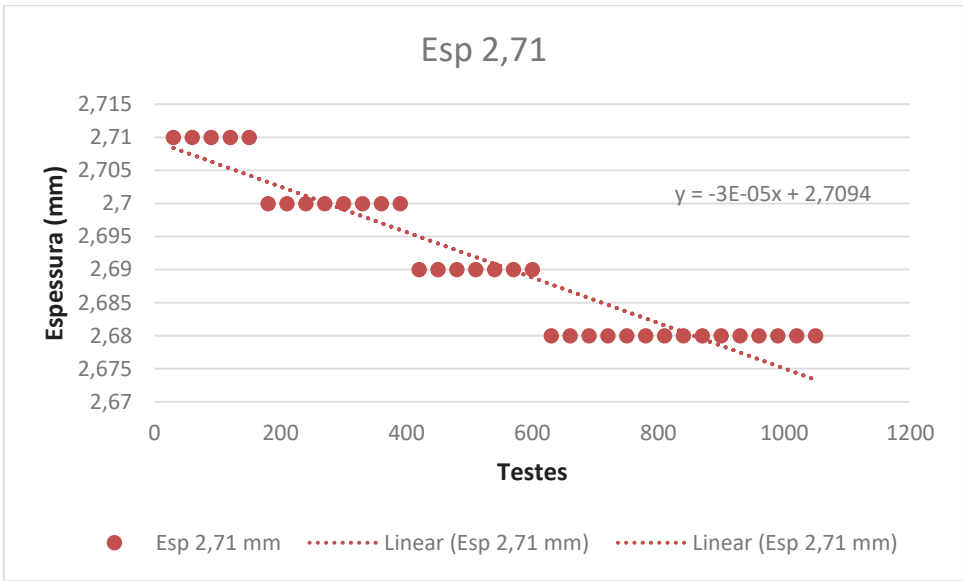
FONTE: O Autor (2019)

A partir disso, foram realizadas medições na espessura da peça a cada 30 utilizações do calibre no teste. Foi escolhida a medida de 30 usos/medição de desgaste, pois o número de controles de folga (usos da peça), nos testes iniciais, ficou acima de 1.000 controles de folga, sem atingir o limite de desgaste para considerar a peça não útil.

Após estas definições, foi realizado o teste definitivo de desgaste das peças (uma em PLA e outra em PETG), para montagem da curva de desgaste da peça (n° de controles de folga x mm de desgaste da peça). Assim, foi realizada uma plotagem com ajuste de curva para estimar o número de ciclos que os calibres poderiam suportar.

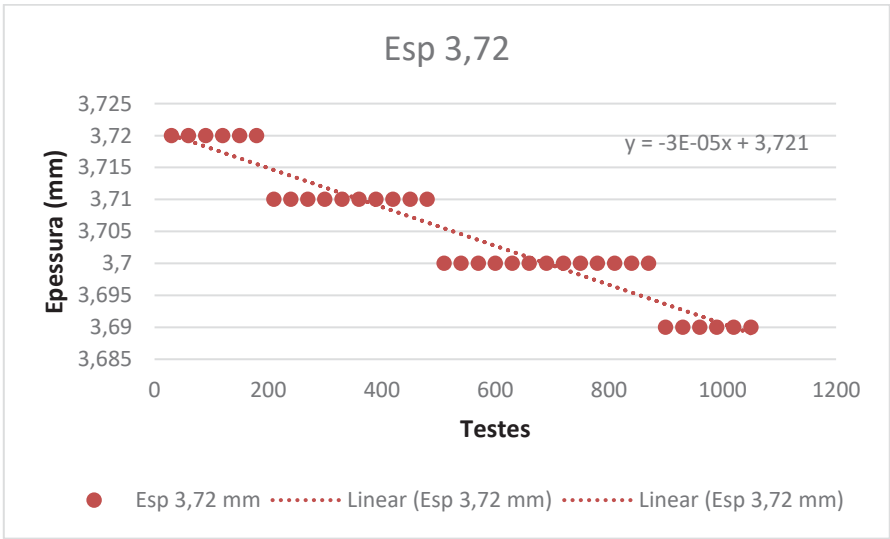
As peças definitivas foram obtidas com as espessuras de 2,71 mm e 3,72 mm de espessura para o material PLA e 2,69 mm e 3,70 mm para o material PETG. O calibre tem como especificação um nominal de 2,60 mm, 2,45 mm para a especificação inferior e 2,75 para a especificação superior. A outra espessura possui um nominal de 3,60 mm, 3,45 mm para a especificação inferior e 3,75 para especificação superior. Do gráfico 1 ao gráfico 4 são demonstradas as plotagens dos dados após ensaios de desgaste das peças.

GRÁFICO 1: DESGASTE DA PEÇA DE PLA PARA A ESPESSURA DE 2,71 MM



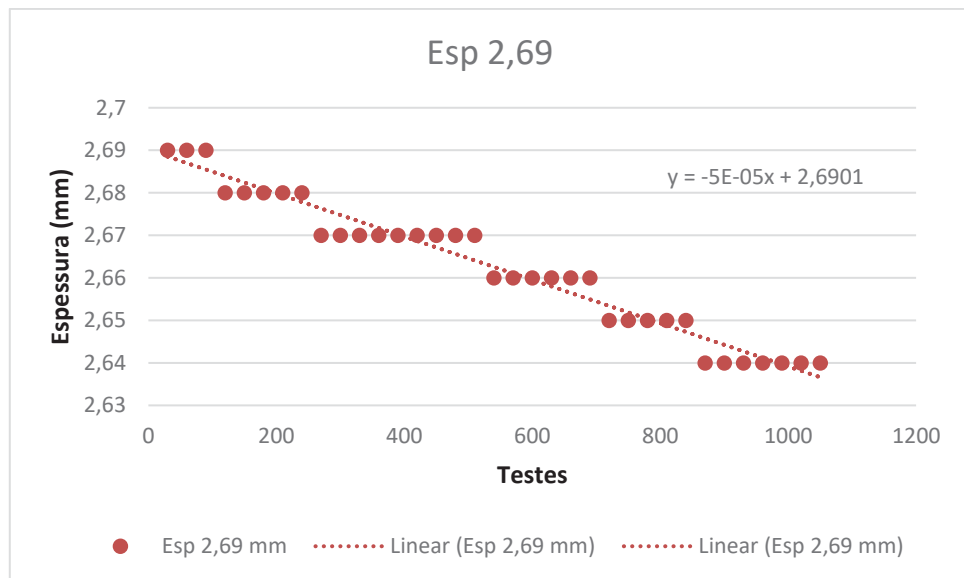
FONTE: O Autor (2019)

GRÁFICO 2: DESGASTE DA PEÇA DE PLA PARA A ESPESSURA DE 3,72 MM



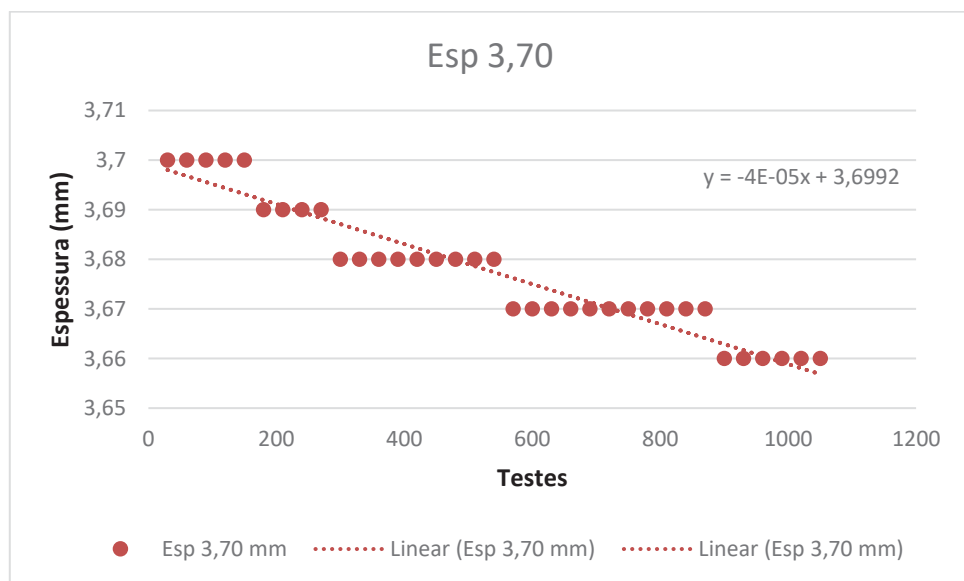
FONTE: O Autor (2019)

GRÁFICO 3: DESGASTE DA PEÇA DE PETG PARA A ESPESSURA DE 2,69 MM



FONTE: O Autor (2019)

GRÁFICO 4: DESGASTE DA PEÇA DE PETG PARA A ESPESSURA DE 3,70 MM



FONTE: O Autor (2019)

A partir da equação gerada para a cada curva foram estimados os valores de vida útil para as peças impressas. O Quadro 3 descreve os resultados encontrados após os testes.

QUADRO 3: VIDA ÚTIL DAS PEÇAS DE PLA E PETG

ESPESSURA (mm)	MINIMO (mm)	ATUAL (Y) (mm)	EQUAÇÃO	RESULTADO DA VIDA ÚTIL (X) (usos)	R ² AJUSTADO
ESP. 2,69 (PETG)	2,45	2,69	$Y = -5E-05X + 2,6901$	4802	0,96
ESP. 2,71 (PLA)	2,45	2,71	$Y = -3E-05X + 2,7094$	5188	0,88
ESP. 3,70 (PETG)	3,45	3,7	$Y = -4E-05X + 3,6992$	4984	0,92
ESP. 3,72 (PLA)	3,45	3,72	$Y = -4E-05X + 3,721$	5420	0,96

FONTE: O Autor (2019)

A partir dos dados foi definido o número de peças equivalentes entre elas, dado essencial para a ACV e CCFM no processo de análise de Uso da Peça. O cálculo do R² ajustado demonstrou bons resultados, devido a ferramenta de medição ter erros na casa dos milímetros, indicando bom ajuste da curva. Como resultado, foi obtida a relação de 1 peça de PETG para 1,0804 peças de PLA, considerando somente a espessura de 2,69 mm e 2,71 mm para fins de simulação por meio das ferramentas.

3.2.5 Avaliação do Ciclo de Vida das Peças

Após a impressão das peças pela impressora 3D, foram aplicadas as 4 etapas para um estudo de ACV, sendo elas a definição de objetivo e escopo, a Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e a interpretação da resposta da análise (ABNT NBR ISO 14044, 2009).

Neste contexto, o detalhamento das etapas de definição de objetivo e escopo e de ICV são apresentadas nas subseções 3.2.5.1 a 3.2.5.3. Isto porque as etapas de AICV e de interpretação correspondem aos resultados e discussão da aplicação da metodologia.

3.2.5.1 Definição de objetivo e escopo

Esta etapa de estudo da ACV é composta pelo objetivo, que compreende a aplicação pretendida, razão e público-alvo do estudo, e também pelo escopo de ACV, que compreende a definição de Função, Unidade Funcional, Fluxo de Referência, Sistema de Produto e Fronteira de Sistema, Pressupostos, Procedimentos de

Alocação e Seleção de Método de Caracterização do impacto do ciclo de vida. O Quadro 4 descreve de forma detalhada o objetivo, aplicação pretendida e público-alvo.

QUADRO 4: DEFINIÇÃO DE OBJETO E ESCOPO

COMPONENTES	CARACTERÍSTICAS
Aplicação pretendida	Comparar o impacto ambiental do ciclo de vida de duas peças impressas pelo processo de Impressão 3D compostas por 2 diferentes materiais, PLA E PETG
Razão	Identificar qual das peças apresenta o menor impacto ambiental.
Público-alvo	Comunidade acadêmica, setores público e privado, interessados na Impressão 3D por impressoras com tecnologia FDM

FONTE: O Autor (2018)

3.2.5.2 Função, unidade funcional e fluxo de Referência

A função de produto foi definida como sendo peça de impressão 3D para atuação como controle de folga de encaixe de junta de portas de um automóvel. O processo de aquisição do calibre de folga possui um alto tempo requerido e um custo alto de fabricação. A impressão 3D tende a reduzir estes custos de fabricação e deslocamento, e por isso começou a ser analisado pela indústria automotiva em estudo.

A unidade funcional foi definida considerando a referência de uso de 4802 controles de folga, sendo o menor uso previsto para o descarte da peça de PETG. Isto porque, nos testes funcionais o PLA apresentou uma vida útil de 5188 controles de folga para a espessura de 2,71 mm e 5420 controles de folga para a espessura de 3,72 mm, e o PETG apresentou a vida útil de 4802 controles de folga para a espessura de 2,69 mm e 4984 controles de folga para a espessura de 3,70 mm. A partir destes resultados o fluxo de referência foi definido como 1 peça de PETG e 1,0804 peças de PLA para atender a Unidade Funcional de 4802 controles de folga. O Quadro 5 descreve a função, unidade funcional e o fluxo de referência.

QUADRO 5: FUNÇÃO, UNIDADE FUNCIONAL E FLUXO DE REFERÊNCIA

COMPONENTES	CARACTERISTICA
Função	Controle de folga
Unidade Funcional	4802 Controles de folga
Fluxo de Referência	1 peça de PETG e 1,0804 peças de PLA

FONTE: O Autor (2018)

3.2.5.3 Definição de sistema de produto, fronteira de sistema, pressupostos, procedimentos de alocação, método de caracterização e simulação da ACV

O sistema de produto foi definido como sendo do berço ao túmulo. Isto porque, as peças de PETG e PLA impressas foram analisadas desde a extração das matérias-primas que compõe estes materiais até o descarte final delas.

Apesar disso, foi definido um critério de corte de dados de 1% da massa total de entrada de processos, valor este comumente aplicado segundo Passuello *et al.* (2014) de modo a excluir dados de baixa relevância para a análise.

Como fronteiras do sistema, foram definidas como os processos de aquisição de material, pré-aquecimento e impressão da peça para compor o sistema. No processo de aquisição de material as entradas foram definidas como PETG, PLA e embalagem tendo como saídas a embalagem. No processo de pré-aquecimento a entrada foi o consumo de energia não possuindo saídas e no processo de impressão da peça as entradas foram PETG, PLA e energia e as saídas como sobras de PETG e PLA.

Em relação a procedimentos de alocação, foi considerada a recomendação da ISO 14044, que diz que os procedimentos de alocação devem ser evitados sempre que possível (ABNT NBR ISO 14044, 2009).

Em relação ao método de caracterização, foi considerado o método IMPACT 2002+. Este método foi escolhido, pois corresponde ao método mais utilizado na atualidade para avaliação do impacto ambiental em multi-indicadores para produtos, conforme apresentado em estudo de Carvalho *et al.* (2014). O IMPACT 2002+ realiza a avaliação combinada entre o *midpoint/endpoint* conectando os resultados do inventário por meio de 14 categorias *midpoint* e 4 *endpoint* (JOLLIET *et al.*, 2003).

Este método proporciona aproximadamente 1500 substâncias como fatores de caracterização, além de fornecer novos conceitos e métodos de avaliação comparativa entre efeitos de ecotoxicidade e toxicidade humana (HANDBOOK, I. L. C. D, 2010).

Por fim, o processo de simulação da ACV foi realizada por meio da utilização do software SIMAPro 8.5.5. Este software é considerado o mais popular e mais utilizado para avaliação do ciclo de vida de produtos. Um software de modelagem, concebido pela Dutch PRé Consultants, permite a modelagem e análise sistemática e transparente de ciclos de vida complexos a partir de recomendações da série de normas ISSO 14044 (SHAH *et al.*, 2016). O SIMAPro conta com mais de 20 métodos de Avaliação do Impacto do ciclo de vida e mais de 9 bibliotecas de inventários trazendo informações sobre milhares de produtos e processos (ACV BRASIL).

3.3 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

O ICV corresponde aos dados levantados e utilizados para as simulações de impacto do ciclo de vida.

O levantamento destes dados foi realizado e construído conforme Tabela 1, que contém a relação dos materiais, processos e as quantidades na impressão das duas peças a serem analisadas.

Vale ressaltar que os dados utilizados neste estudo corresponderam a duas diferentes fontes de informação, sendo elas a coleta em campo de dados do processo de impressão 3D (dados reais), e dados selecionados da base de dados Ecoinvent 3.4. Esta base de dados é considerada a base mais completa existente para obtenção de informações de processos e produtos.

TABELA 1: LEVANTAMENTO DE MATERIAIS, ENERGIAS E PROCESSOS CORRELATOS PARA COMPOSIÇÃO DO ICV DAS PEÇAS DE PETG E PLA

(continua)

PROCESSO	MATERIAL	QUANTIDADE E UNIDADE
Aquisição material	PETG	1000g
Aquisição material	PLA	1000g
Aquisição material	Massa de embalagem de PETG	75g

TABELA 1: LEVANTAMENTO DE MATERIAIS, ENERGIAS E PROCESSOS CORRELATOS PARA COMPOSIÇÃO DO ICV DAS PEÇAS DE PETG E PLA

(conclusão)

Aquisição material	Massa de embalagem de PLA	75g
Aquisição material	Descarte (destino de embalagem de PETG e PLA)	Aterro
Pré-aquecimento	Consumo de energia de equipamento para o PLA	0,0013 kW.h
Pré-aquecimento	Consumo de energia do equipamento para o PETG	0,0013 kW.h
Impressão de peças	Consumo de energia na impressão do PLA	0,032 kW.h
Impressão de peças	Consumo de energia na impressão do PETG	0,031 kW.h
Impressão de peças	Massa de entrada de PETG	10,188g
Impressão de peças	Massa de saída de PETG	10,15g
Impressão de peças	Massa de entrada de PLA	9,304g
Impressão de peças	Massa de saída de PLA	8,62g
Impressão de peças	Massa de sobra de PETG	0,09g
Impressão de peças	Massa de sobra de PLA	0,17g
Impressão de peças	Volatilidade do PLA	0,6838g
Impressão de peças	Volatilidade do PETG	0,03g
Impressão de peças	Descarte (destino da massa de sobra de PETG e PLA)	Aterro

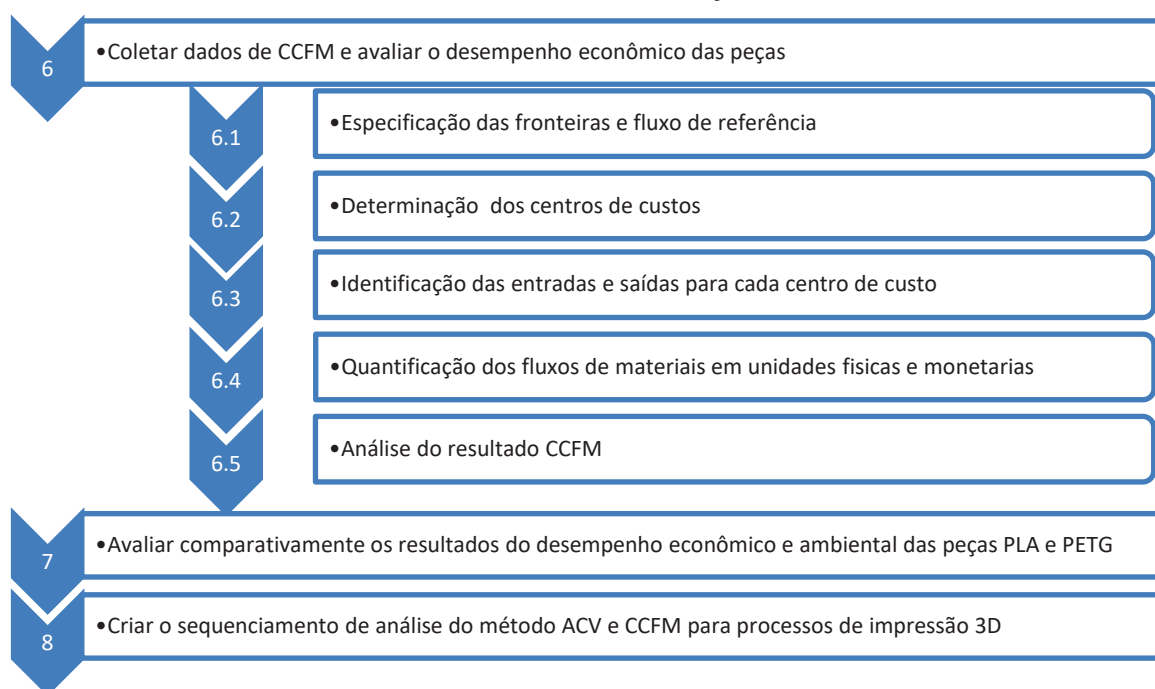
FONTE: O Autor (2018)

A partir da definição de objetivo e escopo e dos dados levantados no ICV para o processo de impressão, realizou-se a AICV e sua interpretação.

3.4 CONTABILIDADE DE CUSTO EM FLUXOS MATERIAIS DAS PEÇAS

A partir do fluxo de trabalho descrito pela Figura 19, a sexta etapa foi subdividida em 5 etapas para implementação da CCFM (NBR ISO 14051)-

FIGURA 19: ETAPAS DE REALIZAÇÃO DA CCFM



FONTE: O Autor (2018)

O detalhamento destas etapas segue nas seções 3.4.1 e 3.4.2

3.4.1 Especificação das fronteiras e do fluxo de referência de análise

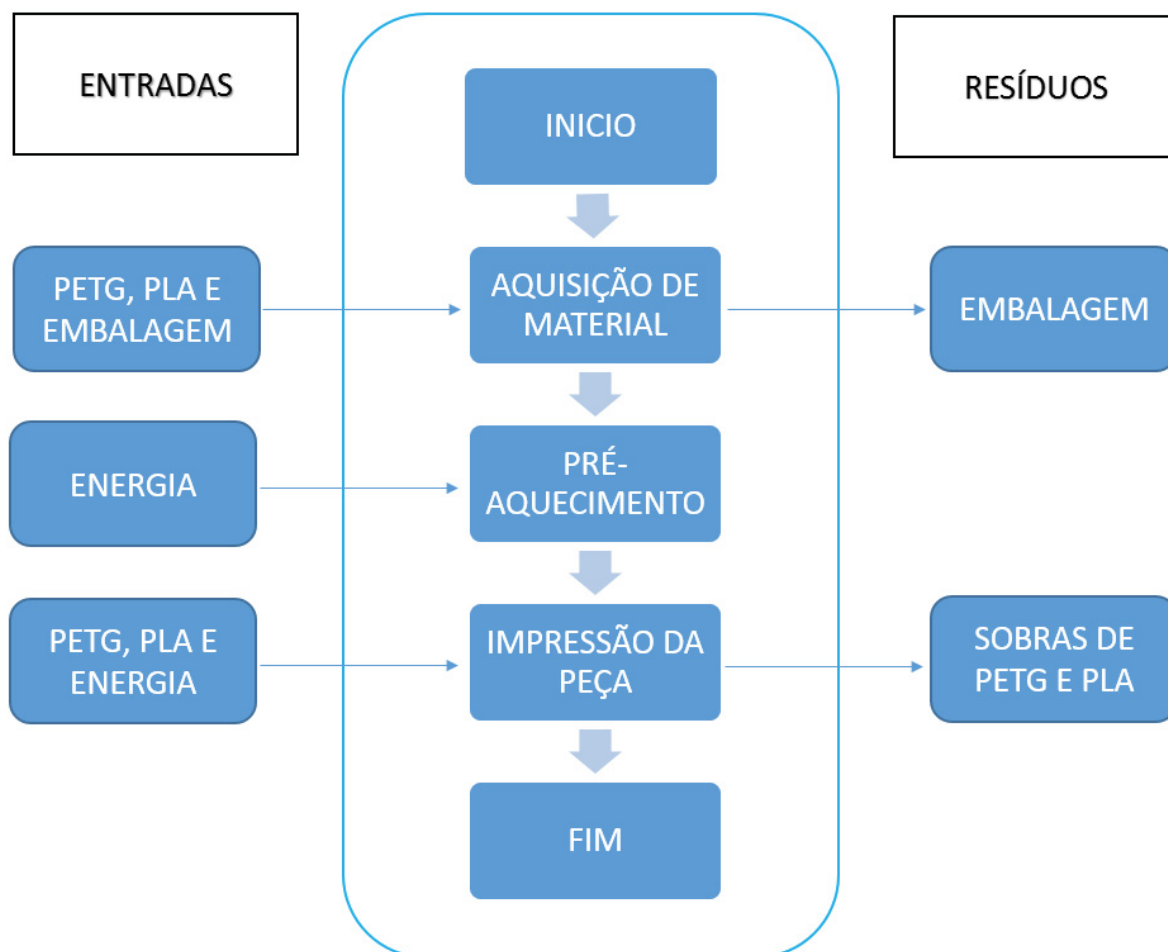
O sistema a ser analisado foi o processo de impressão da peça calibre de folga. As fronteiras foram definidas conforme a ACV que envolve a aquisição de material (Matéria-prima), o pré-aquecimento da impressora e a posterior impressão da peça. No processo de ACV e CCFM, o aterro foi considerado como destino para os resíduos gerados.

Por fim, assim como na ACV, foi considerada 1 peça de PLA e 1,0804 peças de PETG como Fluxo de Referência para análise pela CCFM.

3.4.2 Determinação dos centros de custo e identificação de entradas e saídas

Os centros de custo inicialmente criados para a análise do processo de impressão 3D pela CCFM estão apresentados na Figura 20.

FIGURA 20: CENTROS DE CUSTOS DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D COM IDENTIFICAÇÃO DE ENTRADAS E SAÍDAS DE PROCESSO



FONTE: O Autor (2018)

Como dados a serem utilizados para a análise pela CCFM, foram inicialmente utilizados os dados já levantados no ICV do estudo da ACV das duas peças impressas. Além disso, foram levantados os custos dos materiais, energia e mão-de-obra.

4 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A partir dos parâmetros definidos na impressão, o calibre de folga como peça impressa, e os testes de impressão foi possível realizar a simulação da ACV e a mensuração da CCFM, conforme apresentado nas seções 4.1 e 4.2.

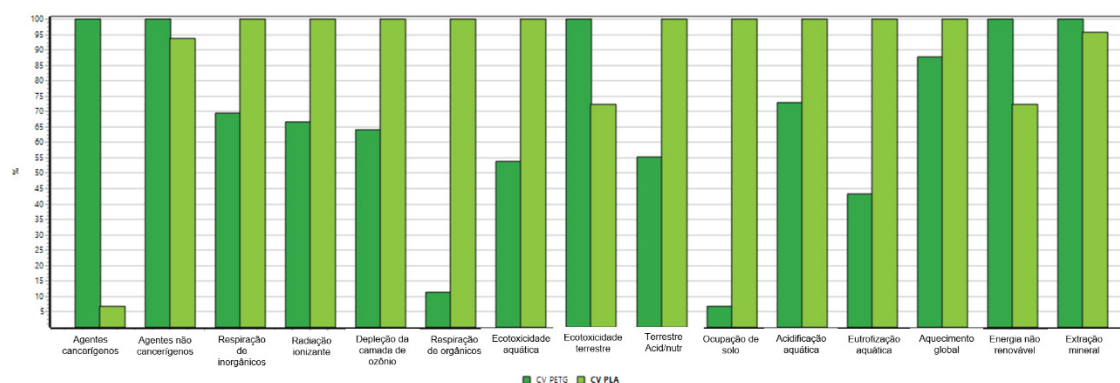
4.1 RESULTADOS DA ACV DAS PEÇAS DE PLA E PETG

A Avaliação do Impacto do ciclo de vida foi obtida por meio da comparação entre os ciclos de vida das peças produzidas, realizados no software SIMAPro v8.5.5. O método IMPACT 2002+ foi escolhido, pois corresponde ao método mais utilizado para avaliação do impacto ambiental em multi-indicadores (Carvalho *et al.*, 2014). A unidade funcional foi determinada como 4802 controles de folga, sendo este o valor obtido para o material PETG na espessura de 2,69 mm. Para o fluxo de referência foi utilizado a unidade funcional e realizado o cálculo para o PLA. Como resultado obteve-se 1 peça de PETG para 10804 peças de PLA, que foram utilizados para simulação de ACV.

Por meio do Método IMPACT 2002+, foram abordadas 14 categorias de impacto *midpoint*: toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação ionizante, depleção de ozônio, formação de ozônio fotoquímico, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre, acidificação aquática, eutrofização aquática, acidificação e eutrofização terrestre, ocupação do solo, aquecimento global, uso de energia renovável e extração mineral, sendo considerados os de pontuação única.

Os resultados obtidos na Caracterização são apresentados na Figura 21. Observa-se que em 5 categorias de impacto o Ciclo de Vida (CV) do PETG apresentou uma porcentagem maior nos impactos, sendo elas agentes cancerígenos, agentes não cancerígenos, ecotoxicidade terrestre, energia não renovável e extração mineral. Nas demais categorias de impacto, o CV do PLA apresentou maior potencial de impacto ambiental. Vale ressaltar que a categoria agentes cancerígenos apresentou um predomínio de potencial de impacto no ciclo de vida do PETG, superior a 90%, e as categorias respiração de orgânicos e ocupação do solo apresentaram um predomínio de potencial de impacto do CV do PLA, superiores a 15% e 10% respectivamente.

FIGURA 21: COMPARATIVO DOS CENÁRIOS DO CICLO DE VIDA DO PLA E PETG PELO MÉTODO IMPACT 2002+ (CARACTERIZAÇÃO)



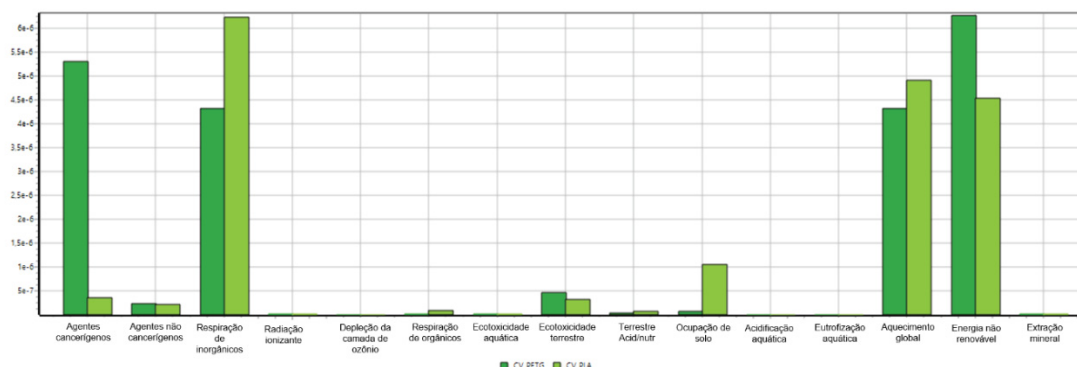
FONTE: O Autor (2018)

Apesar dos resultados mostrados na Figura 21, este comparativo de Cenários apresenta apenas o comportamento dos indicadores de categoria de impacto de forma isolada. Ou seja, não é possível concluir qual dos dois Ciclos de Vida dos materiais apresenta o maior potencial de impacto ambiental. Neste sentido, torna-se necessária a verificação da intensidade de contribuição em potencial de impacto de cada categoria, a qual é possível por meio da Normalização (FIGURA 22).

Através da normalização das categorias de impacto, pôde-se perceber que as 4 categorias que mais influenciaram no potencial de impacto para o CV do PETG foram, em ordem decrescente: energias não renováveis, agentes cancerígenos, respiração de inorgânicos, e ecotoxicidade terrestre. Para o CV do PLA as categorias foram, em ordem decrescente: respiração de inorgânicos, aquecimento global, energia não renovável e ocupação de solo. As demais categorias apresentaram contribuições abaixo de 2% em relação ao potencial de impacto global.

Neste contexto, é percebido que os maiores potenciais de impacto dos CVs analisados encontram-se em 5 categorias de impacto, conforme já descrito, definindo assim o foco de análise para identificar as causas que influenciam no desempenho ambiental deles.

FIGURA 22: COMPARATIVO DOS CENÁRIOS DO CICLO DE VIDA DO PLA E PETG PELO MÉTODO IMPACT 2002 (NORMALIZAÇÃO)

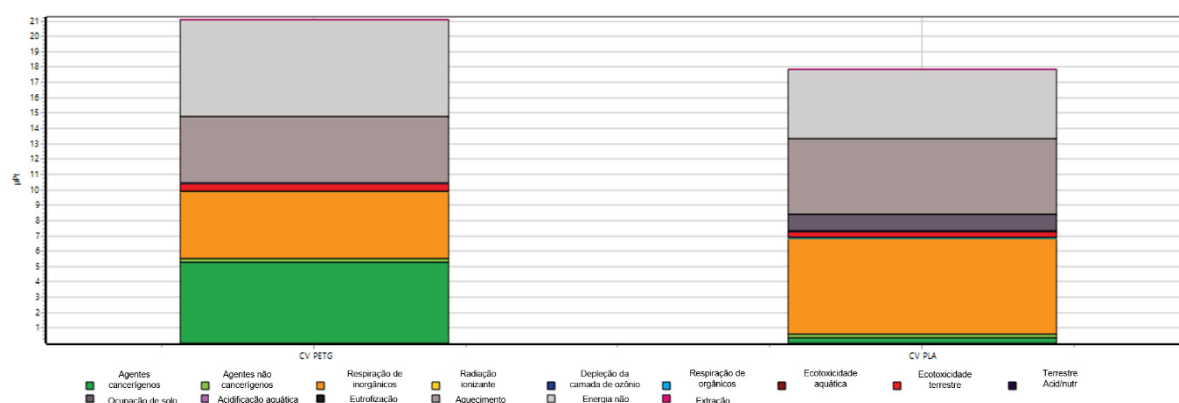


FONTE: O Autor (2018)

Uma outra forma de visualização dos resultados de multi-indicadores para os dois CVs é a partir da **Pontuação Única (Pt)**. Nela, percebe-se ao comparar visualmente a Figura 23, que as diferenças nos ciclos de vida mostraram uma μPt total de 17,9 para o CV do PLA e 21,1 para o CV do PETG. Ou seja, este resultado sugere que na simulação realizada, para o cenário definido de impressão 3D pela tecnologia FDM, a peça impressa em PLA apresentou um menor potencial de impacto ambiental global do que a peça em PETG.

Apesar deste resultado, o CV do PLA apresentou um potencial de impacto ambiental para a categoria de respiração de inorgânicos de 6,50 μPt contra 4,95 μPt do PETG. Esta categoria de impacto é considerada uma das mais significativas dentro do método IMPACT 2002+, apresentando um valor relativamente superior de fator de normalização dentro da classe de Danos à Saúde humana, quando comparada as outras categorias nesta classe (HUMBERT, GOODKOOP e SPRIESNMA, 2000). Ela apresenta importância para Danos à Saúde humana, pois está relacionada a emissão de Material Particulado < 2,5 μm , os quais tem sido associadas a vários tipos de câncer e também a uma variedade de efeitos não carcinogênicos nas pessoas (SPADARO e RABL, 1999), além de compostos gasosos inorgânicos, tais como CO (monóxido de carbono, NO_x (óxidos de nitrogênio) e SO_x (óxidos de enxofre), bastante tóxicos para os seres humanos, podendo provocar danos pulmonares e também processos inflamatórios, principalmente em crianças, idosos e pessoas asmáticas (DIBOFORI-ORJI e BRAIDES, 2013; WHO, 2006).

FIGURA 23: COMPARATIVO DOS CENÁRIOS DO CICLO DE VIDA DO PLA E PETG PELO MÉTODO IMPACT 2002+ (PONTUAÇÃO ÚNICA)



FONTE: O Autor (2018)

Para buscar melhor entendimento e explicação dos resultados das categorias de impacto que obtiveram os maiores valores para os CVs do PLA e do PETG, conforme já apresentado, foram analisados os resultados das contribuições de impacto dos processos envolvidos nos ciclos de vida destes polímeros. Além disso, também foram investigadas as contribuições dos materiais considerados nestes processos ao longo do ciclo de vida de cada filamento.

Neste contexto, foram elaboradas as seções 4.1.1 que trata dos resultados de inventário (contribuição de materiais) e a 4.1.2 que trata dos resultados de contribuições de processos ao longo do ciclo de vida dos processos de impressão 3D com PLA e PETG.

Para a análise destes resultados, foi realizado um corte de 1% dos dados apresentados nos Gráficos e Tabelas de modo a facilitar a visualização e interpretação dos resultados.

4.1.1 RESULTADOS DE INVENTÁRIO (CONTRIBUIÇÃO POR MATERIAIS)

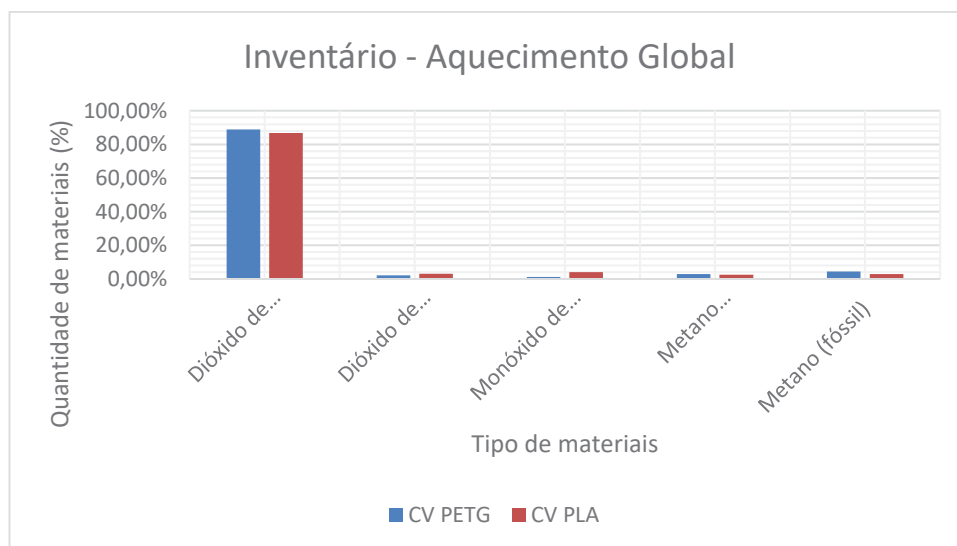
Nesta seção, são apresentados os resultados da contribuição em potencial de impacto de materiais presentes nos ciclos de vida analisados para a impressão 3D em PLA e PETG. Os resultados são apresentados compondo um Gráfico e uma Tabela para cada categoria de impacto considerada relevante, ou seja, com os maiores valores de potencial de impacto, conforme seção anterior. As categorias de impacto analisadas foram: aquecimento global, agentes cancerígenos, respiração de

inorgânicos, energia não renovável e ocupação do solo. As Tabelas foram utilizadas para apresentar, além dos nomes dos materiais e informações numéricas (em micropontos), a identificação dos materiais conforme apresentada pelo software SIMAPro, correspondendo a nomenclatura dos materiais presentes na base de dados Ecoinvent 3.4.

Assim, a Tabela 2 e o Gráfico 5 apresentam os resultados de inventário para a categoria aquecimento global. As emissões totais para os CVs do PETG e PLA foram de 0,0428 kg_{eq}CO₂ e 0,0457 kg_{eq}CO₂, respectivamente.

Compondo estes valores totais, as maiores contribuições referentes ao CV do PETG foram: dióxido de carbono (fóssil), representando um total de 88,90 %, o metano (fóssil) (4,49%), o metano (biogênico) (2,88%) e o dióxido de carbono pela transformação do solo (2,18%). Para o CV do PLA, os principais contribuintes foram: dióxido de carbono (fóssil) (86,77%), monóxido de dinitrogênio (4,08%), dióxido de carbono, pela transformação do solo (3,13%), metano de origem fóssil (2,92%) e metano (biogênico) (2,60%).

GRÁFICO 5: INVENTÁRIO – AQUECIMENTO GLOBAL



FONTE: O Autor (2019)

Verificou-se que o dióxido de carbono (fóssil), metano (fóssil), dióxido de carbono (transformação do solo) e metano (biogênico) são comuns aos dois ciclos de vida analisados. A contribuição do dióxido de carbono (fóssil) do material PETG, refere-se à cerca de 1,2% da contribuição gerada pelo material PLA. A contribuição do metano (fóssil) do PETG, refere-se à cerca de 21,18% da contribuição gerada pelo

PLA. A contribuição do metano (biogênico) do material PETG, refere-se a cerca de 6,65% da contribuição gerada pelo PLA. Por outro lado, a contribuição do dióxido de carbono (transformação do solo) do material PLA, refere-se a 17,89% de contribuição gerada pelo material PETG. Estudos como o de Lamnatou *et al.* (2019) obtiveram resultados de maior impacto na categoria de aquecimento global para o PETG, enquanto que Madival *et al.* (2009) e Vink *et al.* (2003) evidenciaram este maior impacto em aquecimento global para o PLA.

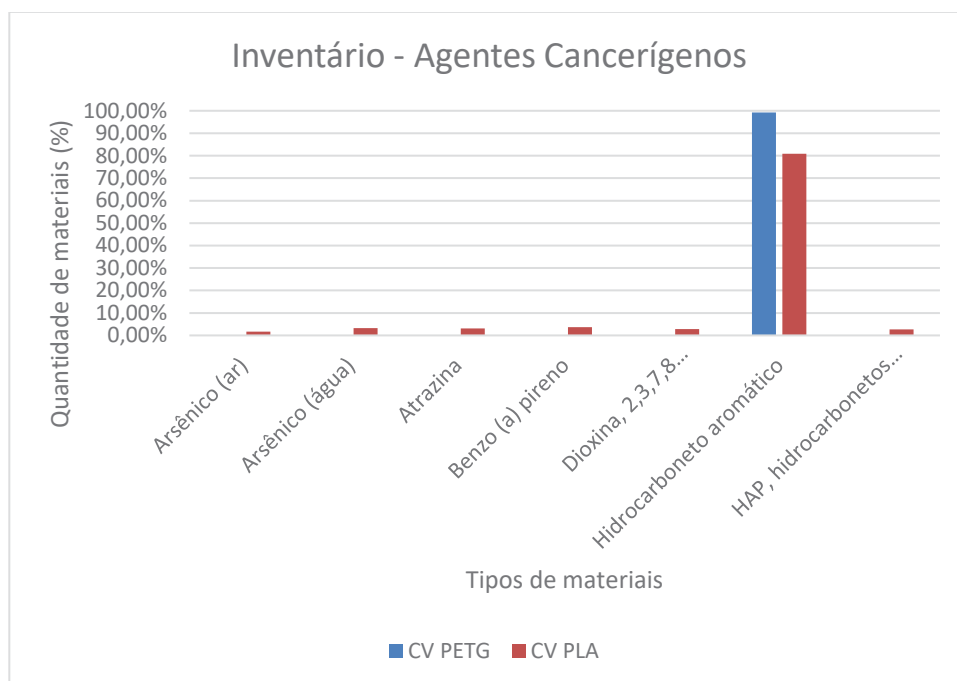
TABELA 2: INVENTÁRIO – AQUECIMENTO GLOBAL

Materiais	Nome dos materiais (Ecoinvent 3.4)	CV PETG	CV PLA
Dióxido de Carbono (fóssil)	Carbon dioxide, fossil	3,8438	4,2700
Dióxido de Carbono (transformação do solo)	Carbon dioxide, land transformation	0,0941	0,1542
Monóxido de dinitrogênio	Dinitrogen monoxide	0,0497	0,2007
Metano (biogênico)	Methane, biogenic	0,1245	0,1280
Metano (fóssil)	Methane, fossil	0,1942	0,1439

FONTE: O Autor (2019)

A Tabela 3 e o Gráfico 6 apresentam os resultados de inventário para a categoria agentes cancerígenos. Os resultados totais de emissão de agentes cancerígenos foram de 0,0134 kg_{eqC2H3Cl} e 0,000845 kg_{eqC2H3Cl} para o PETG e PLA, respectivamente. As maiores contribuições referentes ao CV do PETG foram: hidrocarbonetos aromáticos (ar), representando um total de 99,20 %. Para o CV do PLA, os principais contribuintes foram: hidrocarbonetos aromáticos (ar) (80,91%); Benzo(a)pireno (3,75%); arsênio (água) (3,20%); Atrazina (3,15% Pt); 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (2,2%) e HPAs – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (2,63%).

GRÁFICO 6: INVENTÁRIO – AGENTES CANCERÍGENOS



FONTE: O Autor (2019)

Verificou-se que somente os hidrocarbonetos aromáticos (ar) são comuns aos dois ciclos de vida considerados. Apesar disso, devido ao valor bastante superior de emissões de Hidrocarbonetos Aromáticos no CV do PETG, cerca de 0,0133 kg_{eqC2H3Cl} contra 0,000683 kg_{eqC2H3Cl} do PLA, fez com que seu ciclo de vida apresentasse um potencial de impacto significativo em relação ao PLA. Segundo Silva e Kulay (2006), poluentes químicos do ar como os Hidrocarbonetos Aromáticos estão relacionados ao desenvolvimento de muitas lesões em seres humanos, apresentando efeitos significativos relacionados a problemas cancerosos.

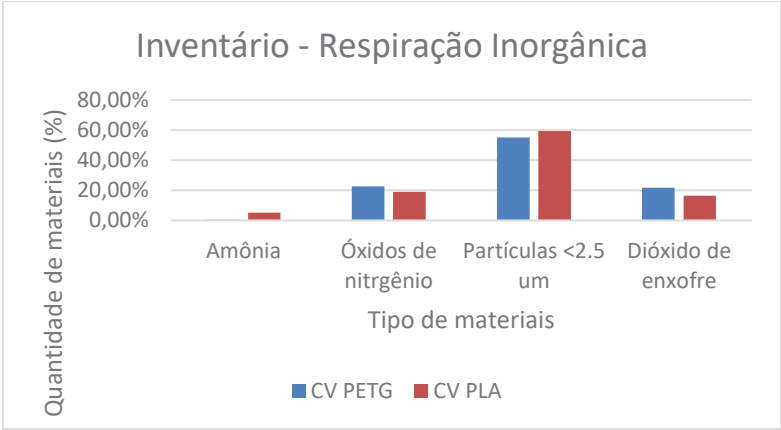
TABELA 3: INVENTÁRIO – AGENTES CANCERÍGENOS

Materiais	Nome dos materiais (Ecoinvent 3.4)	CV PETG	CV PLA
Arsênico (ar)	Arsenic (ar)	0,0061	0,0060
Arsênico (água)	Arsenic (água)	0,0084	0,0114
Atrazina	Atrazine	0,0000	0,0112
Benzo (a) pireno	Benzo(a)pyrene	0,0086	0,0134
Dioxina, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-	Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	0,0060	0,0101
Hidrocarboneto aromático	Hydrocarbons, aromatic	5,2666	0,2893
HAP, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	0,0050	0,0094

FONTE: O Autor (2019)

A Tabela 4 e o Gráfico 7 apresentam os resultados de inventário para a categoria respiração inorgânica. O total de emissões apresentados pelos CVs do PETG e PLA para esta categoria foram de $4,39 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_{\text{eqPM}_{2,5}}$ e $5,97 \cdot 10^{-5} \text{ kg}_{\text{eqPM}_{2,5}}$, respectivamente. As maiores contribuições referentes ao CV do PETG foram: Material Particulado < 2.5 μm ($\text{MP}_{2,5}$), representando um total de 55,13 %; óxidos nitrogenados (22,58%); e o dióxido sulfuroso (21,79%).

GRÁFICO 7: INVENTÁRIO – RESPIRAÇÃO DE INORGÂNICOS



FONTE: O Autor (2019)

Para o CV do PLA, os principais contribuintes foram: Material Particulado < 2.5 μm , representando um total de 59,49%; óxidos nitrogenados (18,99%); dióxido sulfuroso (16,46%) e amônia (5,06%). A contribuição do $\text{MP}_{2,5}$ do material PLA refere-se à cerca de 3,8% da contribuição gerada pelo material PETG. A contribuição do material PETG relacionado ao dióxido sulfuroso e óxidos nitrogenados, referem-se à cerca de 13,93% e 8,63% da contribuição gerada pelo PLA, respectivamente. Conforme já comentado na seção 4.1, os compostos componentes desta categoria apresentam potencial de impacto significativo a saúde humana de seres humanos.

TABELA 4: INVENTÁRIO – RESPIRAÇÃO DE INORGÂNICOS

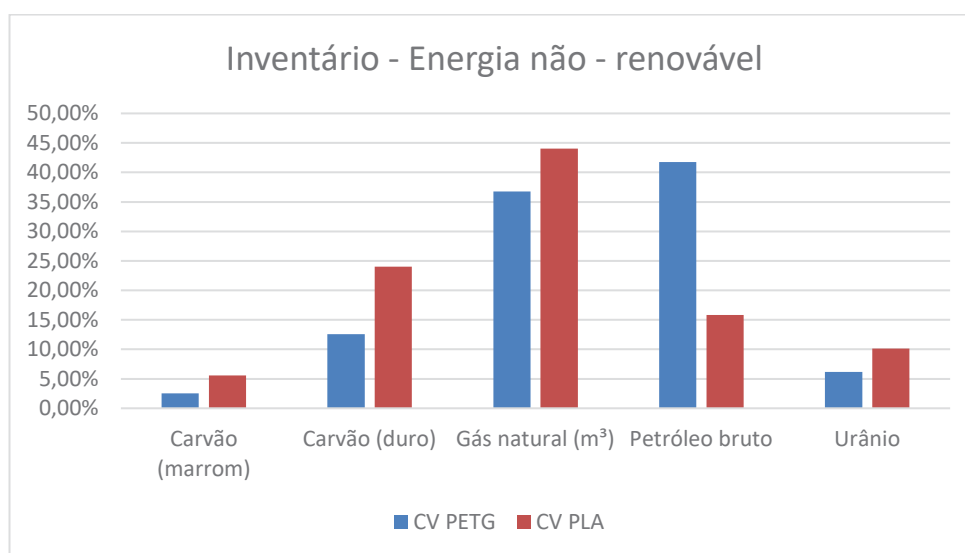
Materiais	Nome dos materiais (Ecoinvent 3.4)	CV PETG	CV PLA
Amônia	Ammonia	0,0215	0,3154
Óxidos de nitrogênio	Nitrogen oxides	0,9788	1,1830
Partículas <2.5 um	Particulates, < 2.5 um	2,3893	3,7061
Dióxido de enxofre	Sulfur dioxide	0,9444	1,0254

FONTE: O Autor (2019)

O Gráfico 8 e a Tabela 5 descrevem as 7 substâncias que compõem os resultados de inventário para energia não renovável. Os potenciais de impacto totais para os CVs do PETG e PLA devido ao consumo de materiais não renováveis utilizados na produção de energia foram de 0,953 MJ_{primário} e 0,640 MJ_{primário}, respectivamente.

Para o CV do PETG houve a predominância do óleo bruto e gás natural que juntos corresponderam 78,50% do total das substâncias. Para o CV do PLA o gás natural representou 44,02% seguido do carvão duro com 24,04% de contribuição.

GRÁFICO 8: INVENTÁRIO – ENERGIA NÃO-RENOVÁVEL



FONTE: O Autor (2019)

Quando os materiais foram analisados em comparação, o PLA apresentou uma representatividade de 44,02% enquanto o PETG 36,74% em relação a substância gás natural. Esse valor cresce quando são comparadas as substâncias óleo bruto e carvão duro. Para o carvão duro o PLA apresentou um inventário 24,04%, enquanto que para o óleo bruto o PETG representou 41,7 %. Observa-se que os compostos pertencentes a esta categoria de impacto, relacionados normalmente ao consumo de petróleo, carvão mineral e gás natural, apresentam correlação com os compostos de emissão presentes na categoria de aquecimento global. Por isso, pode ser percebido uma proximidade dos resultados destas duas categorias.

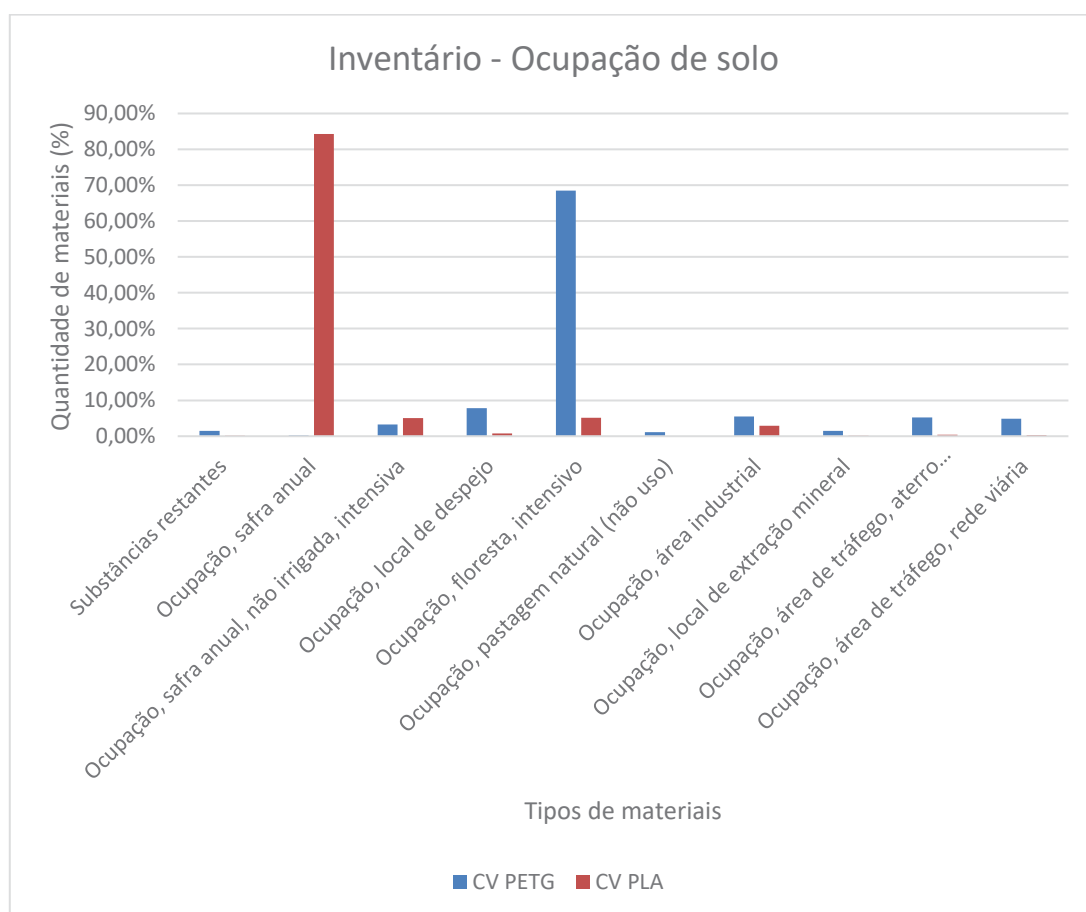
TABELA 5: INVENTÁRIO – ENERGIA NÃO-RENOVÁVEL

Materiais	Nome dos materiais (Ecoinvent 3.4)	CV PETG	CV PLA
Carvão (marrom)	Coal, brown	0,1603	0,2526
Carvão (duro)	Coal, hard	0,7885	1,0914
Gás natural (m³)	Gas, natural/m3	2,3048	1,9985
Petróleo bruto	Oil, crude	2,6193	0,7173
Urânio	Uranium	0,3863	0,4594

FONTE: O Autor (2019)

Por fim, a Tabela 6 e o Gráfico 9 apresentam os resultados de inventário para a categoria de ocupação de solo. As áreas totais de ocupação do solo calculadas para os CVs do PETG e PLA foram de 0,000918 m²_{orgânico-arado} e 0,0123 m²_{orgânico-arado}, respectivamente.

GRÁFICO 9: INVENTÁRIO – OCUPAÇÃO DO SOLO



FONTE: O Autor (2019)

Para este inventário as substâncias contribuintes apresentam-se convergidos para uma determinada categoria. O material PLA apresenta a ocupação por safra

anual correspondendo a 84,32% do total, enquanto que para o PETG essa representação corresponde a 0,20%. A ocupação de floresta intensiva equivale a 68,52% do total enquanto que para o PLA esta significância detém 5,16% do todo.

TABELA 6: INVENTÁRIO – OCUPAÇÃO DE SOLO

Materiais	Nome dos materiais (Ecoinvent 3.4)	CV PETG	CV PLA
Substâncias restantes	Substâncias restantes	0,0011	0,0012
Ocupação, safra anual	Occupation, annual crop	0,0001	0,8919
Ocupação, safra anual, não irrigada, intensiva	Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	0,0024	0,0533
Ocupação, local de despejo	Occupation, dump site	0,0057	0,0079
Ocupação, floresta, intensivo	Occupation, forest, intensive	0,0501	0,0546
Ocupação, pastagem natural (não uso)	Occupation, grassland, natural (non-use)	0,0008	0,0011
Ocupação, área industrial	Occupation, industrial area	0,0040	0,0312
Ocupação, local de extração mineral	Occupation, mineral extraction site	0,0011	0,0016
Ocupação, área de tráfego, aterro ferroviário / rodoviário	Occupation, traffic area, rail/road embankment	0,0038	0,0047
Ocupação, área de tráfego, rede viária	Occupation, traffic area, road network	0,0036	0,0037

FONTE: O Autor (2019)

Neste contexto, de modo a possibilitar traçar conclusões sobre as razões dos valores calculados de potencial de impacto para as 5 categorias analisadas neste tópico, foi realizada a análise de contribuição por processo, que segue seção 4.1.2.

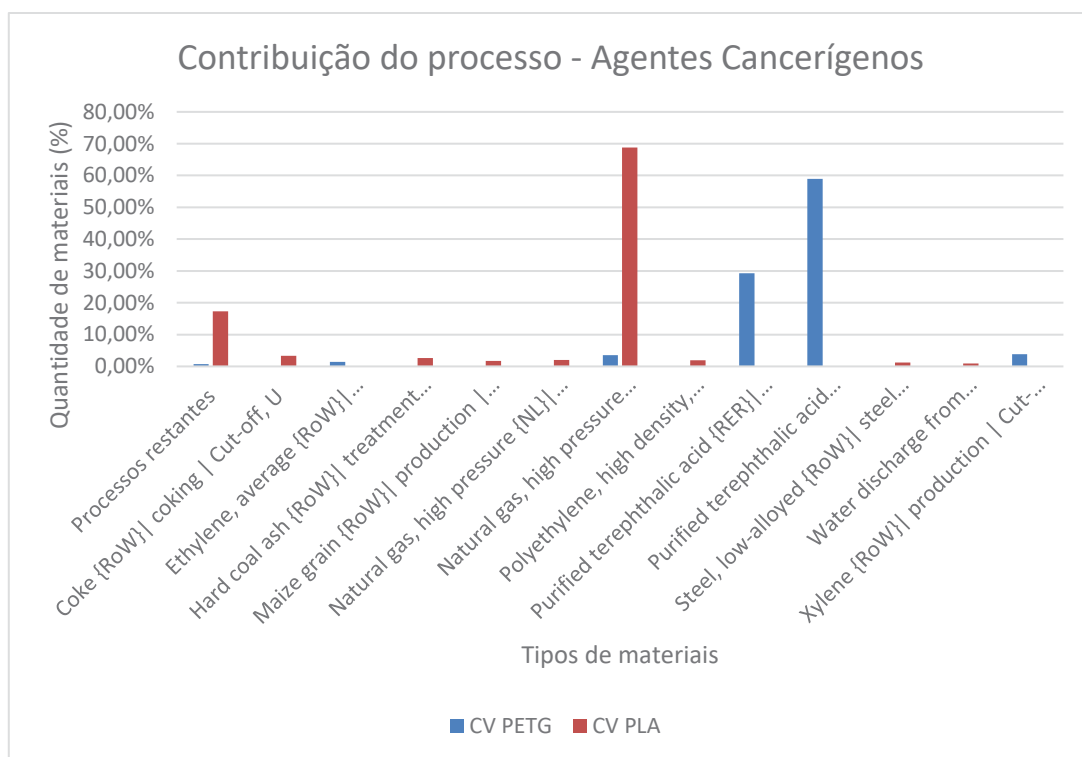
4.1.2 RESULTADOS DE CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO

Assim como analisado por materiais, as 5 categorias de maior impacto foram analisadas quanto a contribuição por processo. Nesta seção, foi utilizada a nomenclatura dos processos, conforme disponibilizado nos resultados da simulação no software SIMAPro para garantir a fidelidade à base de dados. Neste contexto, foi elaborado um Gráfico e uma Tabela para cada categoria de impacto analisada, assim

como em 4.1.1, de modo a facilitar a visualização dos resultados e também das nomenclaturas dos processos.

Desta forma, os agentes cancerígenos apresentaram 15 contribuições por processos, sendo que aqueles considerados, dado o corte de dados (1%), segue Gráfico 10.

GRÁFICO 10: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – AGENTES CANCERÍGENOS



FONTE: O Autor (2019)

Pode-se perceber que a produção de gás natural representou 68,82% do total de contribuição para o PLA, enquanto que para o PETG representou 3,58% de contribuição. Este gás natural presente no PLA tem origem em dois principais processos, sendo eles o consumo de energia no processo de impressão e o consumo de calor no processo de extrusão do polímero para produção do filamento PLA. No PETG, este gás natural é consumido de forma significativa em processos correlatos do PLA, apesar disso, seu valor percentual é bastante inferior devido ao maior potencial de impacto nesta categoria por parte do ácido tereftálico. A produção deste ácido purificado representou 88,65% para o PETG e não houve contribuição quando considerada para o PLA. Ele corresponde a um dos principais reagentes para a

produção do PET, juntamente com o etilenoglicol (MACARIO *et al.*, 2015). Ou seja, está relacionado a fase do ciclo de vida de manufatura do produto químico PET que depois será utilizado na manufatura do filamento PETG (TABELA 7).

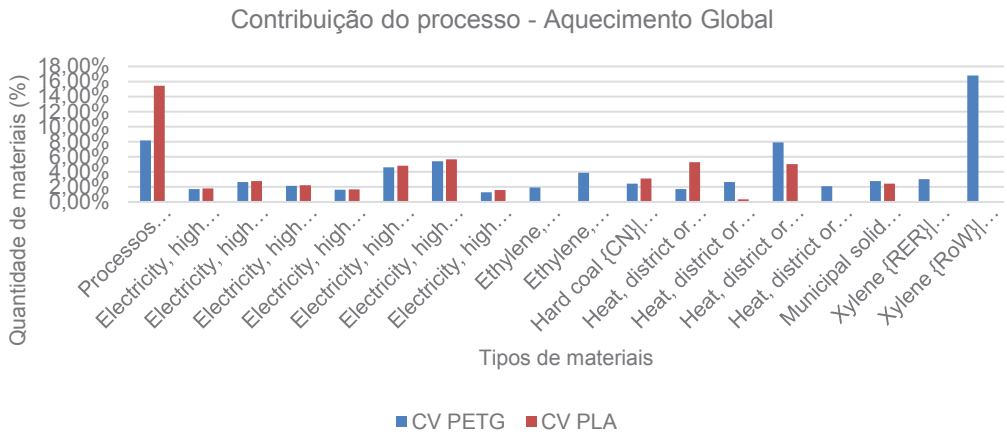
TABELA 7: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – AGENTES CANCERÍGENOS

PROCESSO	CV PETG	CV PLA
Processos restantes	0,0380	0,0618
Coke {RoW} coking Cut-off, U	0,0070	0,0118
Ethylene, average {RoW} production Cut-off, U	0,0744	0,0001
Hard coal ash {RoW} treatment of, residual material landfill Cut-off, U	0,0062	0,0095
Maize grain {RoW} production Cut-off, U	0,0000	0,0063
Natural gas, high pressure {NL} petroleum and gas production, on-shore Cut-off, U	0,0021	0,0072
Natural gas, high pressure {RoW} natural gas production Cut-off, U	0,1902	0,2461
Polyethylene, high density, granulate {RoW} production Cut-off, U	0,0006	0,0070
Purified terephthalic acid {RER} production Cut-off, U	1,5558	0,0000
Purified terephthalic acid {RoW} production Cut-off, U	3,1294	0,0000
Steel, low-alloyed {RoW} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U	0,0045	0,0044
Xylene {RoW} production Cut-off, U	0,0031	0,0033

FONTE: O Autor (2019)

O aquecimento global apresentou um total de 148 contribuições do processo, sendo que com o corte de dados (1%), um total de 18 contribuições foram consideradas (GRÁFICO 11).

GRÁFICO 11: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – AQUECIMENTO GLOBAL – CORTE ACIMA DE 1%



FONTE: O Autor (2019)

A produção de eletricidade de alta voltagem representou 35,95% de contribuição para o PLA, enquanto que para o PETG esta quantidade foi de 27,58% quando somados em ambos os casos. Conforme exploração da rede de resultados fornecida pela simulação, esta energia de alta voltagem está ligada ao consumo de energia, tanto do uso da impressora quanto na fabricação dos filamentos de cada material. Apesar disso, houve uma diferença significativa quando comparado a produção de Xileno, com 16,80% para o material PETG e nenhuma contribuição para o PLA (TABELA 8). O Xileno é um solvente orgânico utilizado na purificação do ácido tereftálico, e este apresenta considerável potencial de aquecimento global devido a emissão de gases como o CO₂ em seu processo de produção.

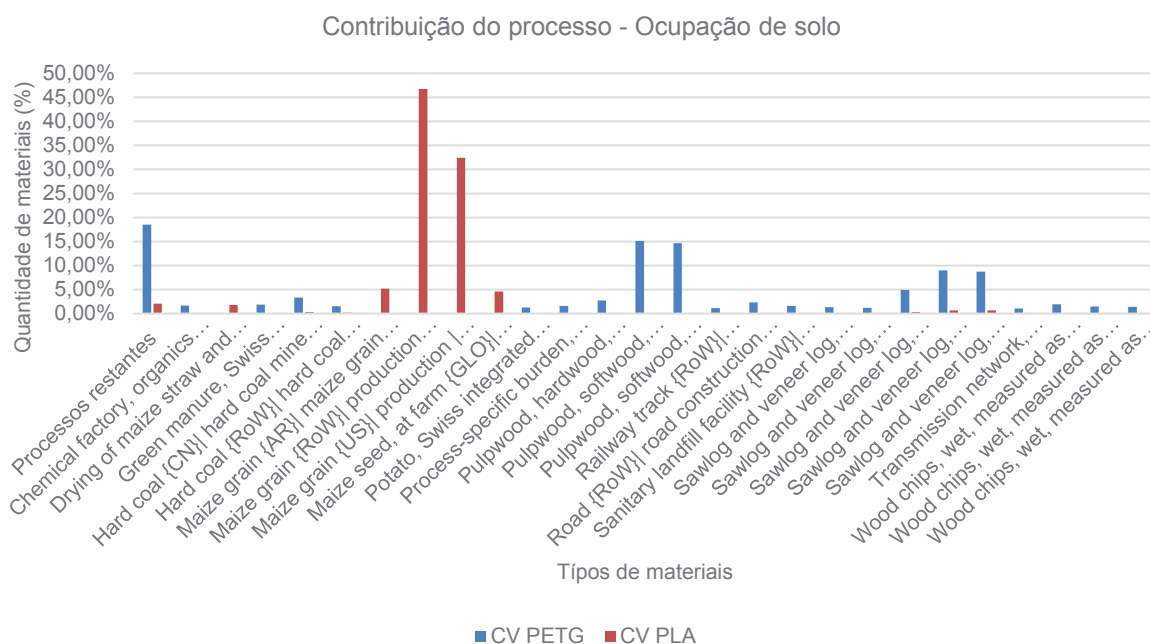
TABELA 8: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – AQUECIMENTO GLOBAL

PROCESSO	CV PETG	CV PLA
Processos restantes	0,3529	0,7603
Electricity, high voltage {BR} electricity production, hard coal Cut-off, U	0,0744	0,0884
Electricity, high voltage {BR} electricity production, hydro, reservoir, tropical region Cut-off, U	0,1140	0,1354
Electricity, high voltage {BR} electricity production, lignite Cut-off, U	0,0927	0,1101
Electricity, high voltage {BR} electricity production, natural gas, combined cycle power plant Cut-off, U	0,0698	0,0829
Electricity, high voltage {BR} electricity production, natural gas, conventional power plant Cut-off, U	0,1987	0,2361
Electricity, high voltage {BR} electricity production, oil Cut-off, U	0,2339	0,2779
Electricity, high voltage {RoW} electricity production, natural gas, conventional power plant Cut-off, U	0,0561	0,0781
Ethylene, average {RER} production Cut-off, U	0,0825	0,0001
Ethylene, average {RoW} production Cut-off, U	0,1671	0,0002
Hard coal {CN} hard coal mine operation and hard coal preparation Cut-off, U	0,1048	0,1536
Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U	0,0735	0,2608
Heat, district or industrial, natural gas {RoW} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U	0,1136	0,0174
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW Cut-off, U	0,3416	0,2478
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW Cut-off, U	0,0902	0,0053
Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill Cut-off, U	0,1199	0,1186
Xylene {RER} production Cut-off, U	0,1312	0,0000
Xylene {RoW} production Cut-off, U	0,7266	0,0001

FONTE: O Autor (2019)

Para ocupação do solo, 38 fatores foram gerados como resultado, sendo que destes um total de 27 contribuições por processo foram consideradas devido ao corte de 1% (GRÁFICO 12).

GRÁFICO 12: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – OCUPAÇÃO DO SOLO



FONTE: O Autor (2019)

Os potenciais de impacto totais em ocupação do solo para o PETG e PLA foram de $0,000918 \text{ m}^2_{\text{orgânico-arado}}$ e $0,0123 \text{ m}^2_{\text{orgânico-arado}}$, respectivamente.

O PETG apresentou uma contribuição de 32,48% quando o processo está relacionado a madeira para trituração, silvicultura florestal, e manejo de floresta sustentável, enquanto para o PLA este valor é de 0,16% (TABELA 9). Conforme rastreado na rede de processos do CV do PETG, foi verificado que este consumo de madeira está relacionado a dois principais processos, sendo eles a fabricação da embalagem de papel (caixa de papel) utilizada para acondicionamento do PETG e a fabricação de pallets de madeira utilizados nos transportes de matérias-primas na fabricação deste polímero.

Estes processos de fabricação da embalagem de papel e de fabricação de pallets de madeira também aparecem no CV do PLA, porém devido a origem do ácido polilático ser de fonte vegetal, foi percebido uma contribuição significativa do processo de produção de grão de milho, representando 88,86% do potencial de impacto deste

ácido, enquanto para o PETG não teve contribuição por ser de fonte fóssil. Neste contexto, pode-se afirmar que o maior impacto potencial de impacto por parte do PLA se deu pelo consumo de área para plantação vegetal para posterior manufatura do ácido, fato este não existente no CV do PETG.

TABELA 9: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – OCUPAÇÃO DE SOLO

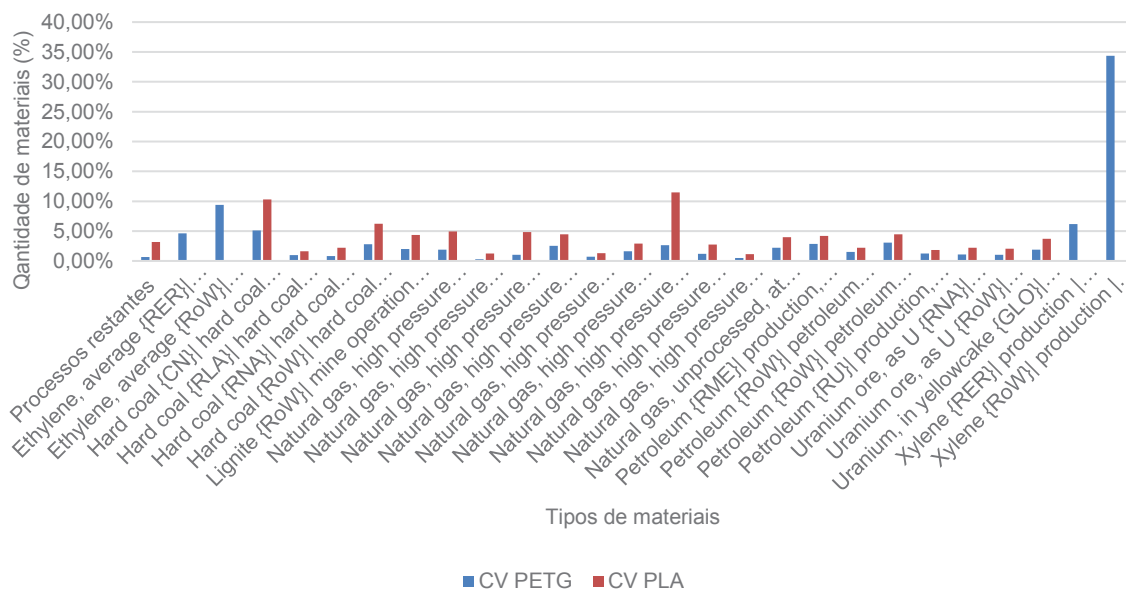
(continua)

PROCESSO	CV PETG	CV PLA
Processos restantes	0,0135	0,0217
Chemical factory, organics {RoW} construction Cut-off, U	0,0012	0,0006
Drying of maize straw and whole-plant {RoW} processing Cut-off, U	0,0000	0,0187
Green manure, Swiss integrated production, until March {CH} production Cut-off, U	0,0013	0,0005
Hard coal {CN} hard coal mine operation and hard coal preparation Cut-off, U	0,0024	0,0036
Hard coal {RoW} hard coal mine operation and hard coal preparation Cut-off, U	0,0011	0,0018
Maize grain {AR} maize grain production Cut-off, U	0,0000	0,0548
Maize grain {RoW} production Cut-off, U	0,0000	0,4941
Maize grain {US} production Cut-off, U	0,0000	0,3427
Maize seed, at farm {GLO} production Cut-off, U	0,0000	0,0482
Potato, Swiss integrated production {CH} potato production, Swiss integrated production, intensive Cut-off, U	0,0009	0,0003
Process-specific burden, sanitary landfill {RoW} processing Cut-off, U	0,0011	0,0011
Pulpwood, hardwood, measured as solid wood under bark {RoW} hardwood forestry, birch, sustainable forest management Cut-off, U	0,0020	0,0008
Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {RoW} softwood forestry, pine, sustainable forest management Cut-off, U	0,0110	0,0005
Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {RoW} softwood forestry, spruce, sustainable forest management Cut-off, U	0,0107	0,0005
Railway track {RoW} construction Cut-off, U	0,0008	0,0010
Road {RoW} road construction Cut-off, U	0,0017	0,0014
Sanitary landfill facility {RoW} construction Cut-off, U	0,0012	0,0012
Sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark {DE} hardwood forestry, beech, sustainable forest management Cut-off, U	0,0010	0,0014
Sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark {RoW} hardwood forestry, beech, sustainable forest management Cut-off, U	0,0009	0,0009
Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {CA-QC} softwood forestry, mixed species, boreal forest Cut-off, U	0,0036	0,0037
Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {RoW} softwood forestry, pine, sustainable forest management Cut-off, U	0,0066	0,0071
Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {RoW} softwood forestry, spruce, sustainable forest management Cut-off, U	0,0064	0,0068
Transmission network, electricity, high voltage {CA-QC} transmission network construction, electricity, high voltage Cut-off, U	0,0008	0,0011

(conclusão)

FONTE: O Autor (2019)

Foi percebido que o CV do PETG apresentou um potencial de impacto total nesta categoria de 0,953 MJ_{primário}, enquanto que o CV do PLA apresentou um resultado de 0,640 MJ_{primário}.



A Tabela 10 mostra a contribuição do Xileno para o PETG, com representação de 40,54%, enquanto que para o PLA não houve contribuição para este processo. Como já comentado para a categoria de aquecimento global, o Xileno é um solvente

utilizado na purificação do ácido tereftálico, e seu significativo impacto na categoria de energia não renovável se deu pela utilização de fonte fóssil de energia para a produção desta substância. Ou seja, combustíveis fósseis são queimados para a produção deste solvente, caracterizando impacto no consumo de energia não renovável, e consequentemente gases de efeito estufa são liberados para a atmosfera, impactando na categoria de aquecimento global.

Outro resultado percebido refere-se a operação de mina de carvão e preparação do carvão, que somadas representam 20,32% para o PLA e 9,69% para o PETG. Este carvão está relacionado a utilização de energia térmica na produção dos polímeros PLA e PETG, mas também está relacionado ao processo de secagem do milho, sendo este matéria-prima para a fabricação do PLA. Devido a este incremento de uso na secagem dos grãos de milho, o PLA apresentou uma maior contribuição deste processo de carvão em relação ao PETG.

Além disso, houve também a contribuição da produção de gás natural, que representou 34,97% para o PLA enquanto que para o PETG somente 12,30%. Porém, quando somados, estes processos refletem 62,53% para o PETG e 55,29 % da contribuição total. A produção de gás natural, como já comentado na categoria de aquecimento global, está relacionada à produção de energia elétrica, tanto para o consumo no processo de impressão, como para o consumo na fabricação dos filamentos de PLA e PETG.

TABELA 10: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – ENERGIA NÃO RENOVÁVEL

(continua)

PROCESSO	CV PETG	CV PLA
Processos restantes	0,0402	0,1452
Ethylene, average {RER} production Cut-off, U	0,2902	0,0004
Ethylene, average {RoW} production Cut-off, U	0,5876	0,0008
Hard coal {CN} hard coal mine operation and hard coal preparation Cut-off, U	0,3195	0,4680
Hard coal {RLA} hard coal mine operation and hard coal preparation Cut-off, U	0,0614	0,0729
Hard coal {RNA} hard coal mine operation and hard coal preparation Cut-off, U	0,0520	0,0991
Hard coal {RoW} hard coal mine operation and hard coal preparation Cut-off, U	0,1749	0,2829
Lignite {RoW} mine operation Cut-off, U	0,1267	0,1973
Natural gas, high pressure {DZ} natural gas production Cut-off, U	0,1188	0,2232
Natural gas, high pressure {NL} petroleum and gas production, on-shore Cut-off, U	0,0166	0,0554
Natural gas, high pressure {NO} petroleum and gas production, off-shore Cut-off, U	0,0631	0,2188

TABELA 10: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – ENERGIA NÃO RENOVÁVEL

(conclusão)

Natural gas, high pressure {RoW} natural gas production Cut-off, U	0,1571	0,2032
Natural gas, high pressure {RoW} petroleum and gas production, off-shore Cut-off, U	0,0458	0,0589
Natural gas, high pressure {RoW} petroleum and gas production, on-shore Cut-off, U	0,1024	0,1317
Natural gas, high pressure {RU} natural gas production Cut-off, U	0,1643	0,5218
Natural gas, high pressure {US} natural gas production Cut-off, U	0,0737	0,1239
Natural gas, high pressure {US} petroleum and gas production, on-shore Cut-off, U	0,0301	0,0507
Natural gas, unprocessed, at extraction {GLO} production Cut-off, U	0,1387	0,1802
Petroleum {RME} production, onshore Cut-off, U	0,1797	0,1901
Petroleum {RoW} petroleum and gas production, off-shore Cut-off, U	0,0954	0,1008
Petroleum {RoW} petroleum and gas production, on-shore Cut-off, U	0,1918	0,2029
Petroleum {RU} production, onshore Cut-off, U	0,0785	0,0830
Uranium ore, as U {RNA} uranium mine operation, underground Cut-off, U	0,0689	0,0991
Uranium ore, as U {RoW} uranium mine operation, underground Cut-off, U	0,0651	0,0936
Uranium, in yellowcake {GLO} uranium production, in yellowcake, in-situ leaching Cut-off, U	0,1179	0,1696
Xylene {RER} production Cut-off, U	0,3889	0,0000
Xylene {RoW} production Cut-off, U	2,1541	0,0002

FONTE: O Autor (2019)

Por fim, a respiração inorgânica apresentou 140 contribuições por processo, mas 21 destes apresentaram valores superiores a 1% da contribuição total de impacto desta categoria (GRÁFICO 14). Os potenciais de impacto totais para os CVs do PETG e PLA apresentaram resultados de $4,39 \cdot 10^{-5}$ $\text{kg}_{\text{eqPM}_{2,5}}$, e $5,97 \cdot 10^{-5}$ $\text{kg}_{\text{eqPM}_{2,5}}$, respectivamente.

Contribuição do processo - Respiração inorgânica - Acima de 1%

Tipos de materiais	CV PETG (%)	CV PLA (%)
Processos restantes	8.50	10.80
Diesel, burned in...	1.00	0.80
Electricity, high voltage...	1.50	1.20
Electricity, high voltage...	14.50	12.00
Electricity, high voltage...	6.00	5.00
Electricity, high voltage...	5.00	6.20
Electricity, high voltage...	1.20	1.50
Electricity, high voltage...	3.80	4.80
Electricity, high voltage...	1.50	1.80
Electricity, high voltage...	3.20	4.20
Electricity, high voltage...	1.50	1.80
Electricity, high voltage...	1.20	1.50
Electricity, high voltage...	1.80	2.00
Electricity, high voltage...	1.80	1.80
Electricity, high voltage...	2.00	2.00
Ethylene, high...	1.80	1.80
Hard coal [CWI] hard...	1.20	1.20
Heat, district or...	7.00	3.50
Maize grain [AR]...	0.00	1.50
Maize grain [RoWI]...	0.00	2.00
Maize grain [US]...	0.00	1.50

Neste cenário a produção de eletricidade foi a responsável por 43,03% para o CV do PLA, sendo um valor próximo quando comparado ao PETG, que obteve 41,66%. A produção de grão de milho novamente apresentou maior contribuição para o PLA, 4,62%, enquanto não houve contribuição para o material PETG. Ou seja, os processos já evidenciados nas categorias de impacto de aquecimento global e energia não renovável, relacionados ao consumo de energia na fabricação dos filamentos e também na impressão das peças, os quais utilizam queima de combustíveis fósseis, além do processo de secagem dos grãos de milho, que utiliza queima de carvão, contribuíram de forma significativa para o potencial de impacto desta categoria de respiração de inorgânicos. Por esta razão das contribuições destas 3 categorias citadas virem de processos correlatos, elas apresentam intensidades de potencial de impacto ambiental semelhantes nas simulações dos CVs do PETG e PLA.

(continua)		
PROCESSO	CV PETG	CV PLA
Processos restantes	0,3654	0,6754
Diesel, burned in building machine {GLO} processing Cut-off, U	0,0434	0,0507
Electricity, high voltage {BR} electricity production, hard coal Cut-off. U	0,0600	0,0713

TABELA 11: CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO – RESPIRAÇÃO INORGÂNICA

(conclusão)

Electricity, high voltage {BR} electricity production, lignite Cut-off, U	0,6231	0,7403
Electricity, high voltage {BR} electricity production, oil Cut-off, U	0,2508	0,2979
Electricity, high voltage {ID} electricity production, lignite Cut-off, U	0,2117	0,3719
Electricity, high voltage {MRO, US only} electricity production, lignite Cut-off, U	0,0430	0,0838
Electricity, high voltage {RFC} electricity production, lignite Cut-off, U	0,1528	0,2969
Electricity, high voltage {RU} heat and power co-generation, lignite Cut-off, U	0,0562	0,1001
Electricity, high voltage {SERC} electricity production, lignite Cut-off, U	0,1345	0,2610
Electricity, high voltage {TR} electricity production, lignite Cut-off, U	0,0571	0,1043
Electricity, high voltage {TRE} electricity production, lignite Cut-off, U	0,0451	0,0877
Electricity, high voltage {WECC, US only} electricity production, lignite Cut-off, U	0,0616	0,1223
Electricity, high voltage, for internal use in coal mining {CN} electricity production, hard coal, at coal mine power plant Cut-off, U	0,0748	0,1096
Electricity, high voltage, for internal use in coal mining {RoW} electricity production, hard coal, at coal mine power plant Cut-off, U	0,0910	0,1333
Ethylene, average {RoW} production Cut-off, U	0,0750	0,0001
Hard coal {CN} hard coal mine operation and hard coal preparation Cut-off, U	0,0475	0,0696
Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW Cut-off, U	0,3068	0,2225
Maize grain {AR} maize grain production Cut-off, U	0,0000	0,0768
Maize grain {RoW} production Cut-off, U	0,0000	0,1246
Maize grain {US} production Cut-off, U	0,0000	0,0864

FONTE: O Autor (2019)

A sequência de resultados deste estudo se dá através da seção 4.2 que apresenta os resultados obtidos pela aplicação da ferramenta CCFM para mensuração do desempenho econômico dos fluxos de materiais e energia os

materiais PLA e PETG. Posteriormente, na seção 4.3, são discutidos os resultados de ambas as ferramentas em conjunto, para traçar conclusões sobre o desempenho econômico-ambiental dos filamentos analisados.

4.2 RESULTADOS DA CCFM DAS PEÇAS DE PLA E PETG

A partir da definição dos centros de custos e a coleta de dados de entradas e saídas, foram obtidas a Tabela 13 e Tabela 14 que apresentam os centros de custos para o processo de impressão, assim como as quantidades de pessoas envolvidas em cada CC e o tempo despendido na realização da atividade. Os centros de custo definidos foram: CC1 – Aquisição material; CC2 – Pré-aquecimento; CC3 – Impressão da peça.

Neste contexto, os valores de PLA e PETG foram obtidos por meio do custo de compra do material. As sobras foram determinadas pelas massas das rebarbas e pela volatilidade do material. A volatilidade foi calculada pela diferença entre a massa total (peça + rebarba) e a massa do filamento utilizado (cálculo utilizando a densidade, comprimento linear, e diâmetro do filamento).

Os custos do sistema (mão-de-obra) foi definido como R\$ 20,00 por hora de impressão, valor definido a partir da média de preço de 3 fornecedores de serviços de impressão. A impressão da peça em PLA teve a duração de 51,86 minutos acrescidos de 2,16 minutos de pré-aquecimento da impressora enquanto que para o PETG a duração foi de 46 min e 57 segundos acrescidos de 2 min de pré-aquecimento. O cálculo da energia levou em consideração o tempo e a potência (40W), para o cálculo do kW.h. O custo do kW.h foi definido como R\$ 0,77 já inclusos os impostos de ICMS e PIS/COFINS, baseado na tarifa atual da COPEL para residências. A gestão de resíduos foi definida a partir da estimativa de quantidade de material gerado por dia (kg) a quantidade de dias no ano (365 dias) e o valor da taxa de coleta de lixo R\$ 471,60 por ser uma localização não residencial.

TABELA 12: DADOS DA CCFM PARA O MATERIAL PETG

CC	Material	Entrada (g)	Saída/ Produto (g)	Saída/ Resíduo (g)	Custo (R\$/g)	Custo de destino (R\$/g)	Energia (kW.h)	Mão-de-obra	
CC1	PETG	10,19	9,3038	0	0,16	0	0	0	
	EMBALA GEM	0,764	0	0,764	0	0,206	0	0	
								Nº	1
CC2	0	0	0	0	0	0	0,0013	CUSTO (R\$/MIN)	0,33
								TEMPO (MIN)	2
								Nº	1
CC3	PETG	10,19	10,06	0,128	0,16	0,206	0,031	CUSTO (R\$/MIN)	0,33
								TEMPO (MIN)	46,95

FONTE: O Autor (2018)

A Tabela 13 descreve os dados obtidos para o material PLA.

TABELA 13: DADOS DE CCFM PARA O MATERIAL PLA

CC	Material	Entrada (g)	Saída/ Produto (g)	Saída/ Resíduo (g)	Custo (R\$/g)	Custo de destino (R\$/g)	Energia (kW.h)	Mão-de-obra	
CC1	PLA	10,052	0	0	0,105	0	0	0	
	EMBALAG EM	0,754	0	0,754	0	0,206	0	0	
								Nº	1
CC2	0	0	0	0	0	0	0,0014	CUSTO (R\$/MIN)	0,33
								TEMPO (MIN)	2,16
								Nº	1
CC3	PLA	10,052	9,13	0,9227	0,105	0,206	0,034	CUSTO (R\$/MIN)	0,33
								TEMPO (MIN)	51,86

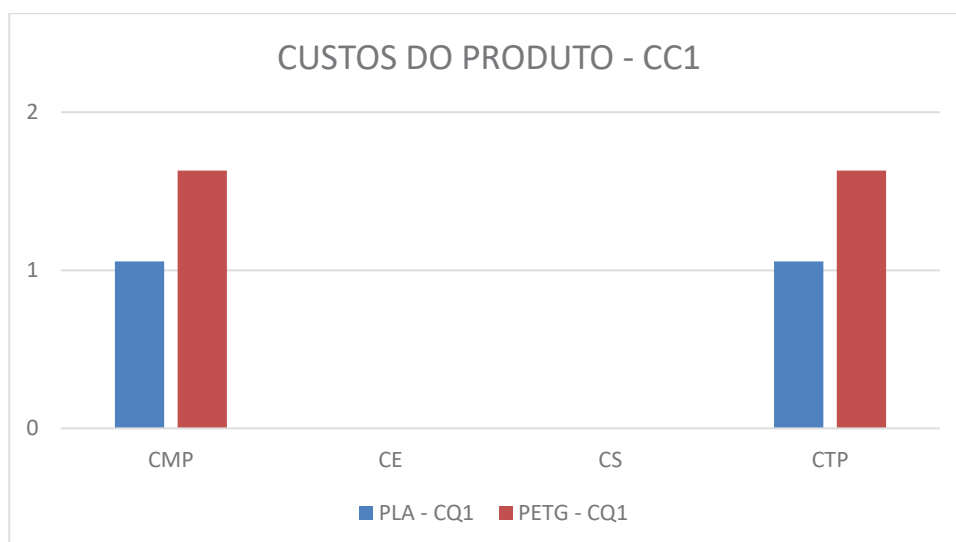
FONTE: O Autor (2018)

A partir da separação dos custos entre produtos e resíduos, foi realizado o comparativo entre os custos dos materiais PLA e PETG. A nomenclatura a seguir foi utilizada para realizar comparativo entre os custos:

- CME – Custo de material de entrada;
- CE – Custo de energia;
- CS – Custo de sistema (mão-de-obra);
- CR – Custo de resíduos;
- CMP – Custo de material (Produto);
- CMR – Custo de material (Resíduo);
- CTP – Custo Total Produto;
- CTR – Custo Total Resíduo.

O Gráfico 15 representa o comparativo em relação aos custos de produtos para o CC1 (Aquisição material). Observa-se que todo custo é referente ao produto para ambos os materiais, dado que neste Centro de Custo não houve consumo de energia e nem de mão-de-obra.

GRÁFICO 15: CUSTOS DE PRODUTO – COMPARATIVO ENTRE PLA E PETG – CENTRO DE CUSTO 1



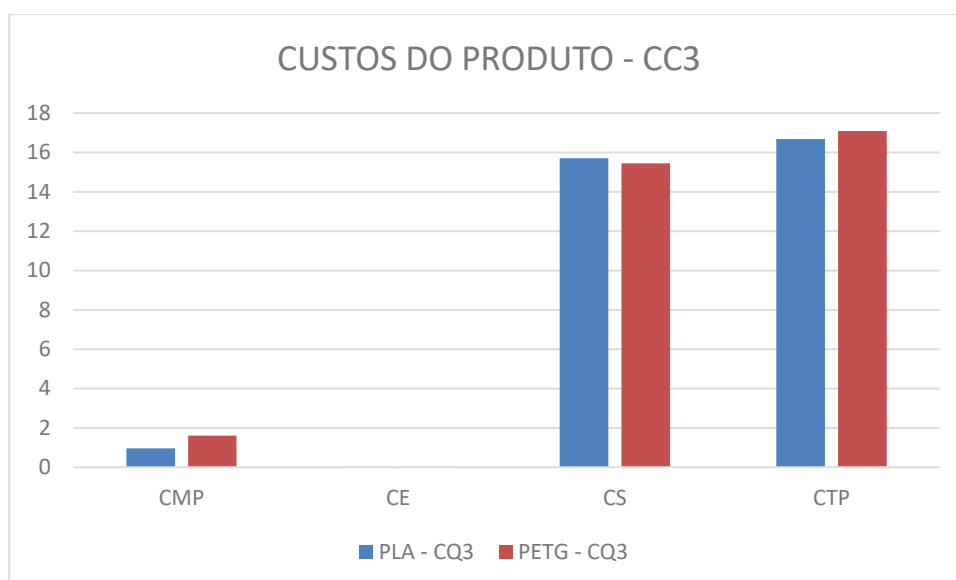
FONTE: O Autor (2019)

Neste comparativo o PETG apresentou maior custo de produto, dado que este custo está relacionado ao preço do kg de material PETG ser superior ao PLA, além da massa de material utilizado ser superior no momento da impressão.

No CC2 (Pré-aquecimento), como não houve fluxos de massa, o resultado final foi nulo para ambos os materiais.

Para o CC3 (Impressão da Peça), o custo de material, custo de energia e custo de sistema (mão-de-obra) são representados pelo Gráfico 16, relativos a contribuição para o produto.

GRÁFICO 16: CUSTOS DE PRODUTO – COMPARATIVO ENTRE PLA E PETG – CENTRO DE CUSTO 3

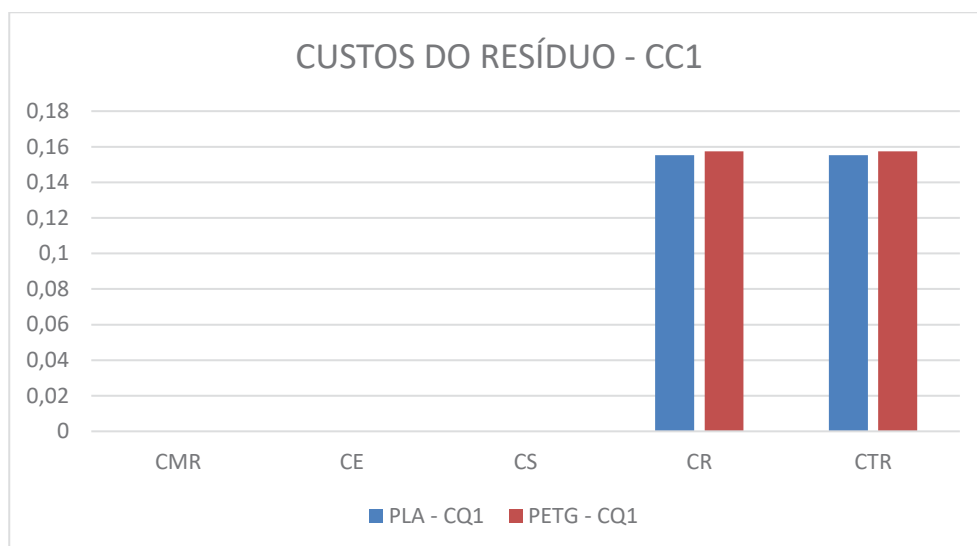


FONTE: O Autor (2019)

Neste processo, assim como o CC1, o PETG representou um custo em relação material PLA no quesito custo de material. Para o custo de energia o PETG apresentou um valor levemente superior, porém imperceptível no gráfico devido sua ordem de grandeza. Os resultados para este custo de energia foram de R\$ 0,023762 para o PETG e R\$ 0,023747 para o PLA. Esta pequena diferença se deu devido a diferença de tempo do processo de impressão entre os materiais (51,86 minutos para PLA e 46 minutos e 57 segundos para o PETG) e, principalmente, devido a massa resultante na peça impressão, que foi maior no PETG (10,06 g) do que no PLA (9,13 g). Isto também se refletiu para o custo de mão-de-obra, em que o PETG foi novamente superior, devido a massa final da peça.

Para os custos de resíduos, os resultados são mostrados no Gráfico 17. Este item descreve o custo de resíduos no CC1 (Aquisição material), sendo que o PETG apresentou maior custo.

GRÁFICO 17: CUSTOS DE RESÍDUOS – COMPARATIVO ENTRE PLA E PETG – CENTRO DE CUSTO 1



FONTE: O Autor (2019)

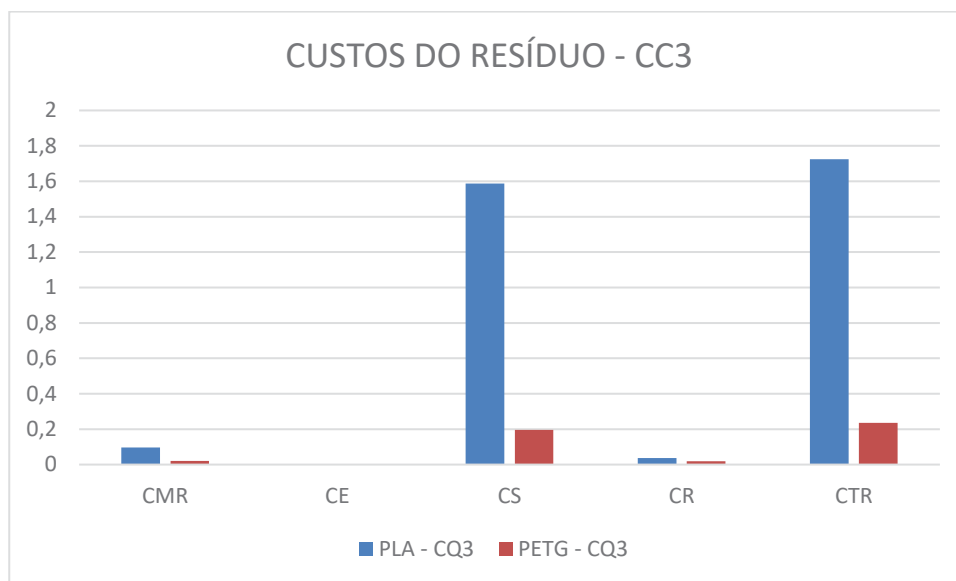
Percebe-se por este Gráfico o, valor do custo de resíduo envolvido que obteve contribuição somente do Custo de Gestão do Resíduo (CR), apresentando resultado igual ao Custo Total de Resíduos (CTR). Isto ocorreu, pois, apesar de não ocorrer perda de filamentos no CC de aquisição material, ocorreu a perda de embalagem do filamento, a qual foi considerada como destinação o aterro sanitário.

Observou-se ainda que o resultado do PETG para este CTR foi levemente superior ao do PLA, pois, como o valor de massa consumida do PETG foi maior, consequentemente a massa de embalagem proporcional a ser descartada foi também superior.

Assim como comentado para o Custo do Produto, o CC2 apresentou resultado nulo para o Custo de Resíduos devido a não existência de fluxo de massa neste CC.

Por fim, para o CC3 referente aos custos de resíduos, o PLA apresentou um custo superior em todos os itens envolvidos (GRÁFICO 18).

GRÁFICO 18: CUSTOS DE RESÍDUOS – COMPARATIVO ENTRE PLA E PETG – CENTRO DE CUSTO 3



FONTE: O Autor (2019)

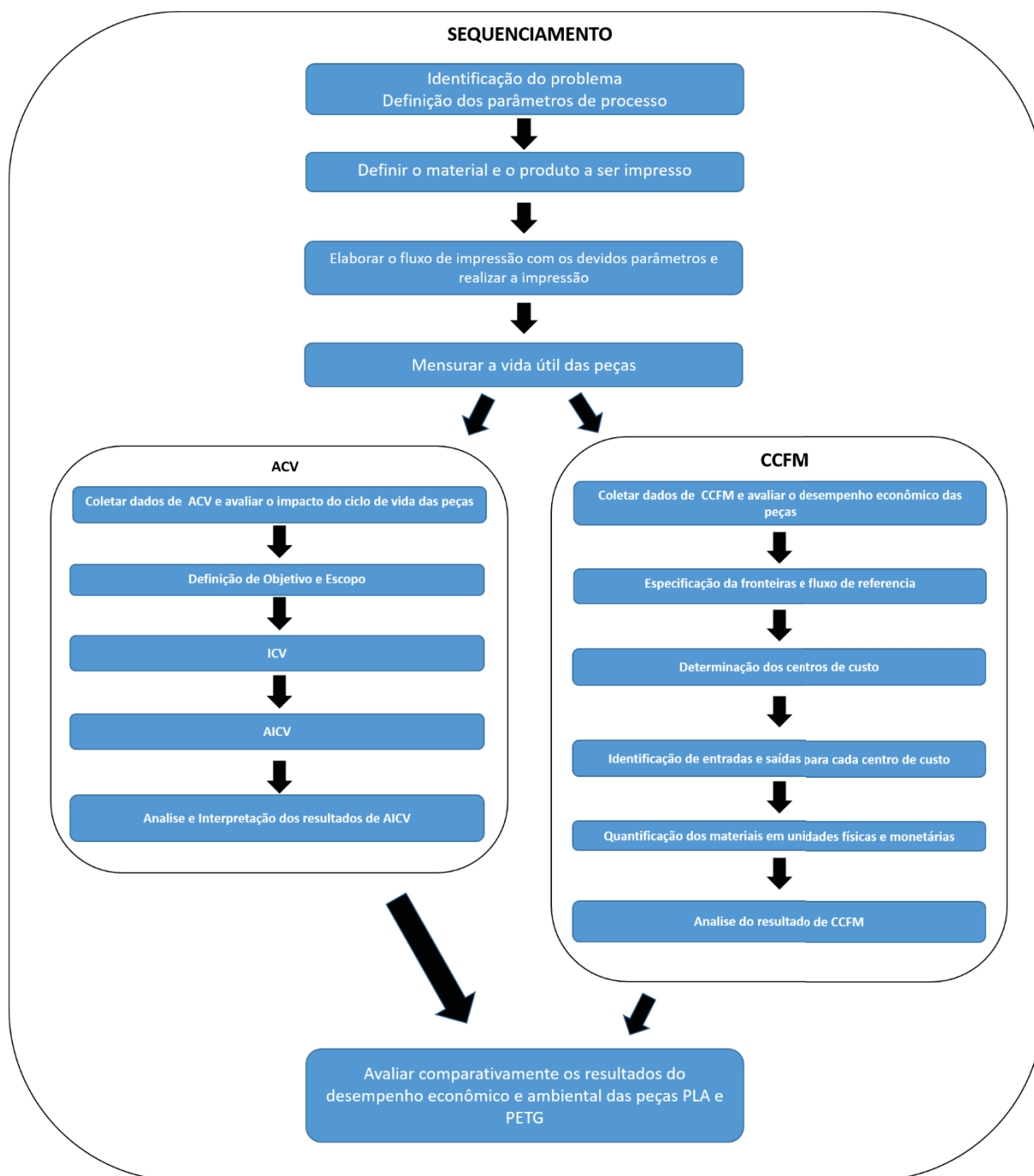
Este resultado se deu, pois, o PLA apresentou uma maior massa de perda (0,9227 g) em relação a perda do PETG (0,128 g). Neste contexto, apesar do valor do custo unitário do PETG ser 52,38% maior do que do PLA, a perda de massa do PLA foi 721 % superior ao do PETG, resultando neste maior custo em resíduos pelo PLA.

Desta forma, a partir dos resultados de ACV e CCFM obtidos, foi elaborada a seção 4.3, que aborda a avaliação comparativa entre os materiais, interpretando comparativamente o desempenho econômico-ambiental deles em relação aos resultados dos métodos aplicados.

4.3 RESULTADOS DO SEQUENCIAMENTO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ACV E CCFM PARA IMPRESSÃO 3D

Através deste estudo foi possível elaborar uma sequência de passos para avaliar o desempenho financeiro-ambiental em processos de impressão 3D (FIGURA 24).

FIGURA 24: SEQUENCIAMENTO DA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL E ECONÔMICO EM PROCESSOS DE IMPRESSÃO 3D.



FONTE: O Autor (2019)

A partir do fluxo de trabalho aliado ao as etapas de ACV e CCFM foi possível criar o sequenciamento da avaliação de desempenho ambiental e econômico para o processo de impressão 3D. O passo-a-passo descreve desde a identificação do problema e definição dos parâmetros a serem utilizados na impressão, seguido da definição do material a ser utilizado e qual produto será impresso. O fluxograma de

impressão é seguido tendo por base as definições anteriores, para entender as entradas e saídas de cada etapa assim como ruídos e parâmetros controláveis e não-controláveis existentes no processo de impressão. A mensuração de vida útil está relacionado à definição dos fluxos de referência, característica específica em cada estudo a ser realizado. A partir destas definições são desmembradas em atividades em paralelo, caracterizadas pelos métodos de ACV e CCFM. Os resultados obtidos a partir do seguimento das 4 etapas de ACV, em convergência aos resultados obtidos a partir da simulação de CCFM possibilitam realizar a análise comparativa desses e posterior direcionamento quando relacionados a desempenho ambiental, econômico ou econômico-ambiental.

4.4 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO AMBIENTAL E ECONÔMICO DAS PEÇAS DE PLA E PETG

A avaliação comparativa do desempenho econômico-ambiental foi obtida utilizando os resultados totais encontrados após a simulação no software SIMAPRo e também os resultados da CCFM.

Primeiramente, a partir dos resultados apresentados na seção 4.1, referente aos potenciais de impacto ambiental totais dos CVs do PETG e PLA, foi percebido que o primeiro apresentou pior desempenho ambiental do que o PLA. As categorias de energia não renovável, agentes carcinogênicos, respiração de inorgânicos e aquecimento global foram as que mais contribuíram para o pior desempenho do PETG (TABELA 14). Já para o PLA, as categorias de respiração de inorgânicos, aquecimento global e energia não renovável foram as mais significativas para o resultado do desempenho ambiental no CV deste material.

Considerando as informações apresentadas em 4.1.1 e 4.1.2, o PETG obteve maior contribuição na categoria de energia renovável pelo consumo dos materiais óleo bruto, gás natural e carvão mineral. O óleo bruto foi identificado nos processos de produção de energia, tanto térmica quanto elétrica, e principalmente no processo de produção do Xileno, solvente este utilizado na purificação do ácido tereftálico, que corresponde a uma matéria-prima da produção do PETG. Já para o carvão mineral, foi verificado seu consumo relacionado aos processos de produção de energia térmica na fabricação do PETG. Por fim, o gás natural apresentou relação com os processos de consumo de energia elétrica, tanto na fabricação do polímero quanto na operação

da impressora. Para o PLA, a relação entre materiais e processos foi semelhante ao PETG, com exceção do processo de produção de Xileno, não existente no CV do PLA, e pelo uso do carvão mineral na secagem de grãos de milho para posterior produção do PLA.

Neste contexto, foi verificado que os maiores contribuintes de potencial de impacto para a categoria energia não renovável, tanto do PETG quanto do PLA, foram os processos relacionados a manufatura destes polímeros, sendo que o pior desempenho do PETG se deu principalmente devido ao maior uso de energia no processo do solvente orgânico Xileno. Lamnatou *et al.* (2019) apresentou em seu estudo de impactos ambientais de um Painele Fotovoltaico, através da utilização do método ReCiPe, contribuições significativas do processo de manufatura do PETG na categoria de energia não renovável em relação ao impacto global deste material em sua análise.

Já em relação a categoria de impacto de agentes cancerígenos, as substâncias com maiores contribuições para ambos os CVs de PETG e PLA foram os Hidrocarbonetos Aromáticos. As emissões destes hidrocarbonetos foram relacionadas principalmente a produção do Xileno no CV do PETG e a produção e posterior queima de gás natural para fornecimento de energia nos processos de extrusão do PLA. Cerdas *et al.* (2017) também evidenciou um impacto significativo nos processos de extrusão e moldagem de PLA em relação a emissão de agentes cancerígenos.

Na categoria de respiração de inorgânicos, a emissão de material particulado $< 2,5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$) foi o grande contribuinte em ambos os CVs analisados. Os processos de produção e uso de energia elétrica, tanto na fabricação dos filamentos quanto na impressão contribuíram de forma significativa para ambos os ciclos de vida pela emissão de $\text{MP}_{2,5}$, porém, a existência do processo de secagem de grãos presente do CV do PLA resultou a ele um pior desempenho ambiental nesta categoria. Por fim, a categoria de aquecimento global apresentou relação principalmente pela emissão de Gases do Efeito Estufa, como CO_2 , em ambos os CVs. Estas emissões foram relacionados aos processos de produção e consumo de eletricidade, tanto na fabricação dos filamentos como no uso da impressora, em ambos os CVs. Além disso, estes gases também contribuíram para o potencial de aquecimento global devido a emissão deles na produção de Xileno no CV do PETG e principalmente pela produção do milho no CV do PLA.

Em uma análise global, percebeu-se que os potenciais de impacto das categorias de aquecimento global, respiração de inorgânicos e energia não renovável, foram relacionados principalmente a processos de produção de energia elétrica e energia térmica, compreendendo a fase de manufatura dos filamentos, a qual envolve conjuntamente a extração das matérias-primas e seus respectivos processamentos. Para estas 3 categorias, foi verificado que o CV do PLA obteve maiores potenciais de impacto para respiração de inorgânicos e aquecimento global. Já o CV do PETG obteve maior potencial de impacto na categoria de energia não renovável.

Apesar destas 3 categorias apresentarem similaridades em relação as suas fontes de geração de potencial de impacto (gases de efeito estufa, material particulado e combustíveis fósseis), ocorreu uma inversão de posição entre PLA e PETG em relação ao maior potencial de impacto na categoria de energia não renovável, possivelmente devido a presença do uso de combustíveis fósseis na produção do Xileno. No entanto, a existência da agricultura no CV do PLA fez com que seu potencial de impacto fosse mais significativo nas categorias de aquecimento global e respiração de inorgânicos. Cerdas *et al.* (2017) evidenciou este alto impacto da atividade de agricultura em relação ao potencial de aquecimento global para o PLA.

TABELA 14: RESULTADOS TOTAIS E POR CATEGORIAS DE IMPACTO

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE	CV PETG	CV PLA
Total	μPt	21,1	17,9
Agentes carcinogênicos	μPt	5,31	0,358
Respiração de Inorgânicos	μPt	4,33	6,23
Ocupação de solo	μPt	0,0731	1,06
Aquecimento Global	μPt	4,32	4,92
Energia não renovável	μPt	6,27	4,54

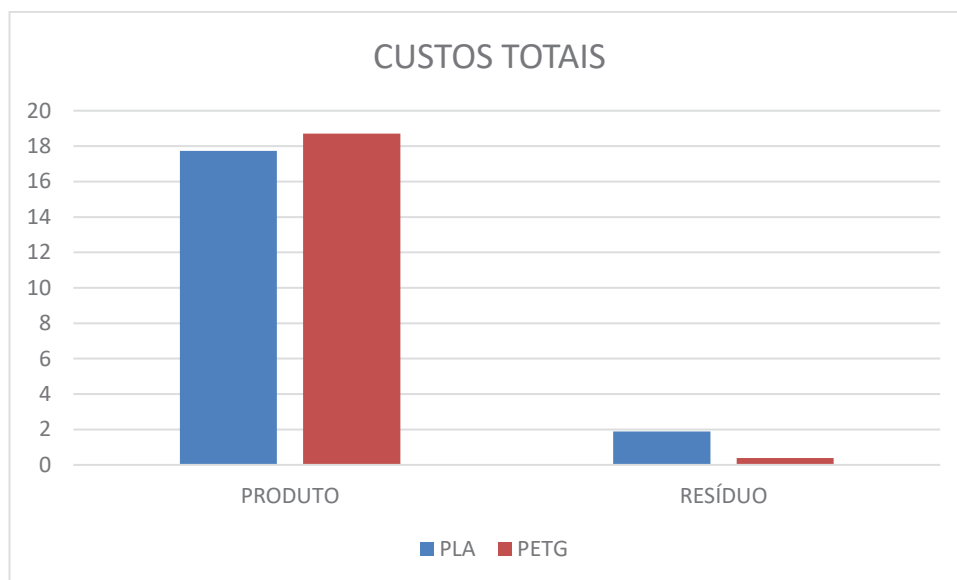
FONTE: O Autor (2019)

Em relação a avaliação comparativa do desempenho econômico dos fluxos materiais e energéticos do processo de impressão 3D para os dois polímeros, foram obtidos os resultados de custos dos produtos e resíduos (Figura 24).

O custo de produto o PETG apresentou maiores custos agregados a ele quando comparados ao PLA. Desta forma, considerando os resultados apresentados na seção 4.2, pode-se dizer que a menor perda de massa (ou seja maior eficiência nos fluxos de transformação matéria-prima para produto) e também o maior custo unitário de aquisição do PETG fizeram com que ele apresentasse este resultado.

Consequentemente, a maior perda de material no processo de impressão do PLA, fez com que ele apresentasse um maior custo de resíduos na comparação, obtendo assim um pior desempenho econômico. Apesar disso, foi percebido que a maior contribuição para este desempenho do PLA veio do custo de sistema (mão-de-obra). Ou seja, o custo do trabalhador para gerar resíduo ao invés de produto. Este destaque da mão-de-obra se deu pelo baixo custo dos materiais e da energia envolvidos na impressão 3D quando comparados a este custo de mão-de-obra.

FIGURA 25: CUSTOS TOTAIS PARA PRODUTO E RESÍDUO DE CADA MATERIAL



FONTE: O Autor (2019)

Neste contexto, pode-se afirmar que PETG apresentou um pior desempenho ambiental baseado na ACV, e o PLA apresentou um pior desempenho econômico em fluxos materiais e energéticos baseado na CCFM.

Em última análise, foi verificado pela ACV que o PETG apresentou potencial de impacto ambiental total 17,8 % superior ao do PLA (de 17,9 μ Pt do PLA para 21,1 μ Pt do PETG). Já pela CCFM, foi verificado que o PLA apresentou uma ineficiência de transformação matéria-prima produto (maior custo de resíduos) 733 % maior que a do PETG (de R\$ 0,235 de custo de resíduo total para o PETG para R\$ 1,723 deste custo para o PLA). Assim sendo, considerando que estes resultados possibilitam o apoio da decisão de usuários em relação a escolha de filamento com melhor desempenho econômico-ambiental para impressão 3D pela tecnologia FDM, pode-se dizer que o PETG obteve um melhor desempenho econômico-ambiental comparativamente ao PLA, dado a maior discrepância de desempenho observada na análise pela CCFM.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa apresentou como objetivo a comparação dos impactos ambientais e econômicos causados pela impressão de uma mesma peça a partir de 2 materiais diferentes, PLA e PETG, por meio dos métodos ACV e CCFM, respectivamente. Foram definidos processos para impressão da peça – aquisição de material, pré-aquecimento, impressão da peça – com o intuito de caracterizar as entradas e saídas utilizadas no estudo de ACV e CCFM. Os objetivos específicos foram alcançados ao determinar os parâmetros que influenciam os processos de impressão, o levantamento de dados de ACV e CCFM por meio da impressão das peças.

A metodologia ACV foi utilizada para comparar o impacto ambiental causado pela impressão das peças em PLA e PETG, utilizando o software SIMAPro v8.5.5. Após a simulação foi possível observar cinco categorias que causaram maior impacto nos ciclos de vida das duas peças dentre as quinze existentes, sendo elas: agentes cancerígenos, aquecimento global, respiração de inorgânicos, ocupação de solo e energia não renovável. Dados de inventário e contribuição dos processos foram obtidos a partir do desdobramento das cinco categorias, sendo comparadas as substâncias e processos impactantes nos materiais de estudo. Por fim, verificou-se através dos impactos totais que o PETG apresentou maior impacto ambiental, ou também o pior desempenho ambiental, tendo os agentes cancerígenos e a energia não renovável como maiores itens de impacto.

Para a metodologia CCFM foi utilizado o comparativo dos impactos econômicos causados pela impressão de peças em PLA e PETG, com o auxílio do software Excel. A partir da obtenção de dados de materiais e energia do método de ACV e acrescidos de dados de mão-de-obra e gestão de resíduos foi possível quantificar os custos envolvidos em cada processo tanto para produto quanto para os resíduos. O material PETG apresentou custos maiores quando comparados ao PLA, devido a massa de material utilizada assim como o preço de sua matéria-prima. Porém, quanto ao custo de resíduos, verificou-se custos maiores para o PLA em relação ao PETG, devido a ineficiência da transformação de massa de material em produto e a consequente perda de custos de mão-de-obra.

Neste contexto, através da análise comparativa entre PLA e PETG dos resultados da ACV e da CCFM, foi possível evidenciar que o PETG apresentou um desempenho econômico na transformação de fluxos materiais e energéticos significativamente superior ao do PLA. E mesmo o PETG apresentando um pior desempenho ambiental pela ACV, o seu desempenho econômico pela CCFM foi proporcionalmente melhor, sendo considerado para este estudo o material com melhor desempenho econômico-ambiental.

Vale aqui ressaltar que as análises realizadas através das metodologias ACV e CCFM foram individualizadas, sendo que neste estudo a escolha do filamento com melhor desempenho econômico-ambiental se deu pela comparação da diferença de resultados entre PLA e PETG para as duas metodologias. Apesar disso, como já mencionado no Capítulo de resultados e discussão, estas metodologias buscam apoiar a decisão de usuários em relação a uma determinada escolha, sendo neste estudo a escolha do filamento para utilização na impressão 3D.

Neste sentido, considerando principalmente a divergência de resultado de indicação de filamento entre as duas metodologias, sugere-se como futuras análises as seguintes ações:

- Busca de maior regionalização dos inventários dos CVs utilizados para os filamentos, proporcionando uma maior proximidade com o cenário de impressão 3D brasileiro;
- Aplicação de outras metodologias de contabilidade de custos ambientais, como a metodologia de Avaliação do Custo do Ciclo de Vida de produtos;

- Ampliação de cenários de análise, principalmente relacionados a definição de destino de peça pós impressão, considerando realidades pertinentes para o mercado empresarial e o usuário residencial, como a de reciclagem da peça; e

- Ampliação de avaliação econômico-ambiental da impressão 3D através da inserção de análise de outras tecnologias, tais como as tecnologias SL, Polyjet, EBM, dentre outras, e também pela abordagem de outras matérias-primas utilizadas nos processos de impressão, tais como o ABS, poliéster e TPU (poliuretano termoplástico).

REFERÊNCIAS

ABREU, Sofia Alexandra Chaves. Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo. 2015.

ACV BRASIL. SIMAPRO. Disponível em <<https://www.acvbrasil.com.br/software/simapro>>. Acesso em 12 de jan. 2019.

AHMED, A. A.; SUSMEL, L. Additively Manufactured PLA under static loading: strength/cracking behaviour vs. deposition angle. **Procedia Structural Integrity**, v. 3, p. 498-507, 2017.

ALL3DP. 2018 3D Printer Filament Guide – All you need to know. Disponível em <<https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>>. Acesso em 06 de jan. 2019.

ANITHA, R.; ARUNACHALAM, S.; RADHAKRISHNAN, P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 118, n. 1, p. 385-388, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14051. **Gestão Ambiental, Contabilidade dos custos de fluxos de material**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044. **Gestão Ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.

BASHKITE, Viktoria; KARAULOVA, Tatyana; STARODUBTSEVA, Olesja. Framework for innovation-oriented product end-of-life strategies development. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 526-535, 2014.

BAUMERS, M. *et al.* Energy inputs to additive manufacturing: does capacity utilization matter. **Eos**, v. 1000, n. 270, p. 30-40, 2011.

BERMAN, Barry. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business horizons**, v. 55, n. 2, p. 155-162, 2012.

BIOFABRIS. PLA: O plástico utilizado para impressões 3D, 2014. Disponível em <<http://biofabris.com.br/pt/pla-o-plastico-utilizado-para-impressoes-3d/>>. Acesso em 14 mai. 2018.

BOPARAI, Kamaljit Singh; SINGH, Rupinder; SINGH, Harwinder. Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review. **Rapid Prototyping Journal**, v. 22, n. 2, p. 281-299, 2016.

BOSE, Susmita *et al.* Additive Manufacturing of Biomaterials. **Progress in Materials Science**, 2017.

BRAZIL POLYMERS. PETG. Disponível em <<http://brazilpolymers.com.br/petg>>. Acesso em 06 de jan. 2019.

CALIGNANO, Flaviana *et al.* Overview on additive manufacturing technologies. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 4, p. 593-612, 2017.

CANO, Emilio L.; MOGUERZA, Javier M.; REDCHUK, Andrés. Process Mapping with R. In: **Six Sigma with R**. Springer, New York, NY, 2012. p. 51-61.

CARVALHO, Ana *et al.* From a literature review to a framework for environmental process impact assessment index. **Journal of cleaner production**, v. 64, p. 36-62, 2014.

CASTANHEIRA, Ana Teresa Gaspar. **Impressão 3D de estruturas para isolamento térmico**. 2016. Tese de Doutorado.

CERDAS, Felipe *et al.* Life cycle assessment of 3D printed products in a distributed manufacturing system. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. S1, p. S80-S93, 2017.

CLIEVER. Desvendando o PETG. Disponível em <<https://www.cliever.com/pt-br/blog/post/21/desvendando-o-petg>>. Acesso em 06 de jan. 2019.

DÍAZ LANTADA, Andrés *et al.* Design and performance assessment of innovative eco-efficient support structures for additive manufacturing by photopolymerization. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. S1, p. S179-S190, 2017.

DIBOFORI-ORJI, A. N.; BRAIDE, S. A. Emission of NO_x, Sox and CO from the combustion of vehicle tyres in an abattoir. **Journal of natural sciences research**, v. 3, n. 8, p. 60-62, 2013.

DIXIT, Nitesh Kumar; SRIVASTAVA, Rajeev; NARAIN, Rakesh. Comparison of two different rapid prototyping system based on dimensional performance using grey relational grade method. **Procedia Technology**, v. 25, p. 908-915, 2016.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. Springer, 2014.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. **São Paulo**, v. 4, 2002.

GÓRSKI, Filip; KUCZKO, Wiesław; WICHNIAREK, Radosław. Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using Fused Deposition Modelling technology. **Advances in Science and Technology Research Journal**, v. 7, n. 19, p. 27--35, 2013.

HAMAD, K. *et al.* Properties and medical applications of polylactic acid: A review. **Express Polymer Letters**, v. 9, n. 5, 2015.

HANDBOOK, I. L. C. D. Analysis of existing Environmental Impact assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. **Joint Research Center-European Commission**, 2010.

HUANG, Bin; SINGAMNENI, Sarat. Raster angle mechanics in fused deposition modelling. **Journal of Composite Materials**, v. 49, n. 3, p. 363-383, 2015.

HUMBERT, Sébastien; MARGNI, Manuele; JOLLIET, Olivier. IMPACT 2002+: user guide. **Draft for version**, v. 2, 2005.

JEREZ-MESA, Ramón *et al.* Fatigue lifespan study of PLA parts obtained by additive manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 872-879, 2017.

JOLLIET, Olivier *et al.* IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. **The international journal of life cycle assessment**, v. 8, n. 6, p. 324, 2003.

KAFARA, M. *et al.* Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and Additive Manufacturing in Mold Core Making for CFRP Production. **Procedia Manufacturing**, v. 8, p. 223-230, 2017.

KASEMSET, Chompoonoot; CHERNSUPORNCHAI, Jintana; PALA-UD, Wannisa. Application of MFCA in waste reduction: case study on a small textile factory in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1342-1351, 2015.

KAUARK, Fabiana da Silva; MANHÃES, Fernanda Castro; MEDEIROS, Carlos Henrique. Metodologia da pesquisa: um guia prático. 2010.

KELLENS, Karel *et al.* Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing?. **Procedia CIRP**, v. 61, p. 582-587, 2017.

KIANIAN, Babak. Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report: Chapters titles: The Middle East, and other countries. 2017.

KRIMI, Imane; LAFHAJ, Zoubeir; DUCOULOMBIER, Laure. Prospective study on the integration of additive manufacturing to building industry-Case of a French construction company. **Additive Manufacturing**, 2017.

KUMAR, G. Pavan; REGALLA, Srinivasa Prakash. Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM). In: **Applied Mechanics and Materials**. Trans Tech Publications, 2012. p. 2245-2251.

KUO, Chil-Chyuan *et al.* A surface quality improvement apparatus for ABS parts fabricated by additive manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 1-4, p. 635-642, 2017. LIU, Zhichao *et al.* Sustainability of 3D Printing: A Critical Review and Recommendations. In: **ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2016. p. V002T05A004-V002T05A004.

LAMNATOU, Chr; SMYTH, M.; CHEMISANA, D. Building-Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPVT): LCA of a façade-integrated prototype and issues about human health, ecosystems, resources. **Science of The Total Environment**, v. 660, p. 1576-1592, 2019.

LUO, Yanchun *et al.* Environmental performance analysis of solid freedom fabrication processes. In: **Electronics and the Environment, 1999. ISEE-1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on**. IEEE, 1999. p. 1-6.

MA, Junfeng *et al.* An exploratory investigation of Additively Manufactured Product life cycle sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 55-70, 2018.

MADIVAL, Santosh *et al.* Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 13, p. 1183-1194, 2009.

MOGNOL, Pascal; LEPICART, Denis; PERRY, Nicolas. Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight. **Rapid prototyping journal**, v. 12, n. 1, p. 26-34, 2006.

MOHAMED, Omar A.; MASOOD, Syed H.; BHOWMIK, Jahar L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. **Advances in Manufacturing**, v. 3, n. 1, p. 42-53, 2015.

MOHAMED, Omar Ahmed; MASOOD, Syed Hasan; BHOWMIK, Jahar Lal. Mathematical modeling and FDM process parameters optimization using response surface methodology based on Q-optimal design. **Applied Mathematical Modelling**, v. 40, n. 23-24, p. 10052-10073, 2016.

MOHAMED, Omar Ahmed; MASOOD, Syed Hasan; BHOWMIK, Jahar Lal. A parametric investigation of the friction performance of PC-ABS parts processed by FDM additive manufacturing process. **Polymers for Advanced Technologies**, 2017

NGO, Tuan D. *et al.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, 2018.

ÔMICROM. Calibrador de Folga. Disponível em <<http://omicrom.com.br/geral/calibrador-de-folga/>>. Acesso em 12 de jan. 2019.

PASSUELLO, Ana Carolina Badalotti *et al.* Aplicação da avaliação do ciclo de vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente construído: revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Porto Alegre, RS. Vol. 14, n. 4 (out./dez. 2014), p. 7-20, 2014.

REJESKI, David; ZHAO, Fu; HUANG, Yong. Research Needs and Recommendations on Environmental Implications of Additive Manufacturing. **Additive Manufacturing**, 2017.

SAHU, Ranjeet Kumar; MAHAPATRA, S. S.; SOOD, Anoop Kumar. A study on dimensional accuracy of fused deposition modeling (FDM) processed parts using fuzzy logic. **Journal for Manufacturing Science & Production**, v. 13, n. 3, p. 183-197, 2013.

SCHMIDT, Mario. The interpretation and extension of Material Flow Cost Accounting (MFCA) in the context of environmental material flow analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1310-1319, 2014.

SHAH, Kunal N.; VARANDANI, Nanik S.; PANCHANI, Monika. Life cycle assessment of household water tanks—A study of LLDPE, mild steel and RCC tanks. **Journal of Environmental Protection**, v. 7, n. 05, p. 760, 2016.

SILVA, G. A.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida. In: VILELA JUNIOR, A.; DEMAJOROVIC, J. **Modelos de ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para as organizações**. São Paulo: Senac, 2006.

SONG, Ruoyu; TELENKO, Cassandra. Material and energy loss due to human and machine error in commercial FDM printers. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 895-904, 2017.

SPADARO, Joseph V.; RABL, Ari. Estimates of real damage from air pollution: site dependence and simple impact indices for LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 4, n. 4, p. 229, 1999.

STEINHILPER, Rolf; SÜCHTING, Martin Andreas; KAFARA, Markus. Total Cost and Environmental Impact of Ownership—TCEIO. **ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb**, v. 108, n. 1-2, p. 63-67, 2013.

STRATASYS. Tecnologia FDM. Disponível em: <http://www.stratasys.com/br/impressoras-3d/technologies/fdm-technology>. Acesso em: 25 de maio de 2017.

TSOUKNIDAS, A. Friction induced wear of rapid prototyping generated materials: a review. **Advances in Tribology**, v. 2011, 2011.

UDROIU, Razvan; BRAGA, Ion Cristian. Polyjet technology applications for rapid tooling. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2017. p. 03011.

VERMA, Saurabh; CHATURVEDI, Vedansh. Multiresponse Optimization of Fused Deposition Modeling Process Using Utility-Based Taguchi Approach. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v. 17, n. 04, p. 551-568, 2018.

VINK, Erwin TH *et al.* Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production. **Polymer Degradation and stability**, v. 80, n. 3, p. 403-419, 2003.

WHO WORKING GROUP *et al.* WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. **Geneva, Switzerland: World Health Organization**, 2005.

WONG, Kaufui V.; HERNANDEZ, Aldo. A review of additive manufacturing. **ISRN Mechanical Engineering**, v. 2012, 2012.

ZHANG, Jin Wen; PENG, An Hua. Process-parameter optimization for fused deposition modeling based on Taguchi method. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications, 2012. p. 444-447.

ZHU, Zuowei; ANWER, Nabil; MATHIEU, Luc. Deviation modeling and shape transformation in design for additive manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 60, p. 211-216, 2017.